

Studijní program N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 Konstrukce strojů a zařízení
Zaměření: Sklářské a keramické stroje

Technologická hlavice průmyslového robotu pro opracování plochého skla

(Technological End Effector of Industrial Robot for Surface Working of Flat Glass)

KSR -

David Fikar

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. František Novotný, CSc.
Konzultant bakalářské práce: Ing. Marcel Horák, PhD.

Rozsah diplomové práce:

Počet stran:	66
Počet tabulek:	10
Počet obrázků:	44
Počet výkresů:	27
Počet modelů:	3

Datum odevzdání: 24. 5. 2013



Originální zadání

Téma: Technologická hlavice průmyslového robotu pro opracování plochého skla

Anotace: Cílem diplomové práce je návrh konstrukčního řešení technologické hlavice průmyslového robotu pro opracování plochého skla. Konstrukce hlavice pracuje na principu mechanického matování kartáči s brusnými zrny syntetického diamantu. Práce předkládá rozbor budoucího vývoje této technologie. Dále jsou zpracovány konstrukční návrhy hlavice a koncepce instalace hlavice do systému s průmyslovým robotem. Součástí práce je také stanovení technických podmínek pro efektivní využití této technologie, které byly zpracované na základě měření funkčního vzorku. Výkresová dokumentace konstrukčního návrhu je přiložena k práci.

Klíčová slova: technologická hlavice, mechanické matování, kartáčování

Theme: Technological End Effector of Industrial Robot for Surface Working of Flat Glass

Annotation: The aim of the diploma thesis is to propose a construction solution of a technological end effector of an industrial robot for a surface working of a flat glass. The construction of the end effector is based on the new method of surface working, which uses brushes with synthetic diamonds grains. The thesis presents possible future development of the mechanical surface working. Furthermore possible designs of the end effector are included in the thesis among the design proposals of the whole system with included an industrial robot. The technical parameters for effective results of the technology are mentioned in thesis and were set on basis of the measurement. Technical drawings of the end effector are attached to the thesis.

Key words: Technological end effector, mechanical matting, brush deburring

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 -školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24. 5. 2013

Podpis:

Poděkování

Děkuji panu **doc. Ing. Františkovi Novotnému, CSc.**, vedoucímu Katedry sklářských strojů a robotiky Technické univerzity v Liberci, za odborné vedení, cenné připomínky a trpělivost v průběhu řešení této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval panu **Ing. Marcelovi Horákovi, PhD.** a **Ing. Michalovi Starému, PhD.** za odbornou pomoc a ochotu související s řešením této diplomové práce.

Také bych rád poděkoval své rodině za podporu během studia.

David Fikar

Obsah

Úvod.....	10
1. Rozbor procesu mechanického matování	12
1.1. Rozbor stávajících metod matování	12
1.2. Rozbor mechanického matování plochého skla	13
1.2.1. Princip kartáčování	13
1.2.2. Vznik a budoucí rozvoj mechanického matování plochého skla.....	15
1.2.3. Obecný rozbor mechanického matování plochého skla	16
1.2.4. Výhody mechanického matování plochého skla	16
1.2.5. Provedení matovacího zařízení	17
1.3. Technické požadavky mechanického matování	18
2. Koncepční návrh technologické hlavice.....	22
2.1. Koncepce instalace hlavice do systému	22
2.2. Koncepce matovací hlavice zkušebního zařízení.....	24
2.2.1. Koncepce systému technologické hlavice s robotem KUKA KR 16	25
2.2.2. Koncepce konstrukce technologické hlavice	31
2.2.3. Koncepce technologického nástroje	38
2.3. Výběr pohonu matovacího nástroje	41
2.4. Technické podmínky instalace efektoru na Robot KUKA KR 16	43
3. Konstrukční řešení.....	45
3.1. Konstrukční řešení matovacího zařízení	45
3.2. Schéma výkresové dokumentace	46
3.3. Konstrukce technologické hlavice	48
3.3.1. Konstrukce rámu technologické hlavice.....	49
3.3.2. Uložení nástroje	52
3.3.3. Matovací nástroj - kartáč	53
3.4. Konstrukce periferních zařízení matovacího zařízení.....	53
4. Odzkoušení funkčního vzorku a formulace technických podmínek	55
5. Technickoekonomické zhodnocení	59
5.1. Technické zhodnocení.....	59
5.2. Ekonomické zhodnocení	60
Závěr	61
Seznam použité literatury	62
Seznam obrázků.....	64
Seznam tabulek	66

Seznam značek a symbolů

Značka	Jednotka	Popis
a	[mm]	délka tabule skla
b	[mm]	šířka tabule skla
C	[N]	únosnost ložiska
D _{en}	[mm]	vnější průměr náboje kartáče
D _h	[mm]	průměr hřídele
D _{in}	[mm]	vnitřní průměr náboje kartáče
D _k	[mm]	průměr kartáče
D _n	[mm]	průměr náboje
D _s	[mm]	průměr vlepené části snopku
D _š	[mm]	průměr šroubu
D _v	[mm]	průměr vlákna
E _v	[Pa]	modul pružnosti vlákna
F _{Gh}	[N]	tíhová síla hlavice
F _{Gm}	[N]	tíhová síla motoru
F _N	[N]	normálová síla
F _R	[N]	výslednice zatěžujících sil kartáče
F _{rm}	[N]	dovolená radiální zatěžující síla hřídele motor
F _š	[N]	osová síla ve šroubu
F _T	[N]	tečná síla
f _{tv}	[-]	tvarový faktor náboje
F _v	[N]	výsledné silové zatížení hlavice
F _x	[N]	tečná zatěžující síla prototypové hlavice
F _y	[N]	axiální zatěžující síla prototypové hlavice
F _z	[N]	normálová zatěžující síla prototypové hlavice
F _{zv}	[N]	zatěžující síla vlákna
g	[m/s ⁻²]	tíhové zrychlení
h	[mm]	výška pera
h _s	[mm]	hloubka předvrtané díry pro snopek
J _v	[mm]	moment setrvačnosti průřezu vlákna
k	[-]	koeficient bezpečnosti
l _{cv}	[mm]	celková délka vlákna
l _{čv}	[mm]	činná délka vlákna

L_h	[hod]	trvanlivost ložiska
l_N	[m]	vzdálenost působíště normálové síly
l_m	[m]	vzdálenost působíště tíhové síly motoru
l_p	[mm]	délka pera
m_{cs}	[kg]	celková hmotnost snopků
$M_{\check{c}}$	[Nm]	činný kroutící moment
m_h	[kg]	hmotnost technologické hlavice
m_{hmax}	[kg]	maximální hmotnost technologické hlavice
M_k	[Nm]	kroutící moment
M_{km}	[Nm]	měrný kroutící moment
M_{kmax}	[Nm]	maximální kroutící moment elektromotoru
M_{kp}	[Nm]	požadovaný kroutící moment motoru
m_m	[kg]	hmotnost elektromotoru
m_n	[kg]	hmotnost náboje
M_n	[Nm]	jmenovitý kroutící moment elektromotoru
M_{op}	[Nm]	ohybový moment úchopné desky
m_p	[kg]	hmotnost podtlakové úchopné desky
$M_{p\check{c}}$	[Nm]	požadovaný činný kroutící moment
m_s	[kg]	hmotnost jednoho snopku vláken
M_x	[Nm]	klopný moment prototypové hlavice kolem osy x
M_y	[Nm]	klopný moment prototypové hlavice kolem osy y
M_z	[Nm]	klopný moment prototypové hlavice kolem osy z
M_{ztr}	[Nm]	ztrátový moment prototypové hlavice
n_h	[min ⁻¹]	otáčková frekvence hřídele
n_k	[min ⁻¹]	otáčková frekvence kartáče
n_{max}	[min ⁻¹]	maximální otáčky motoru
n_n	[min ⁻¹]	jmenovité otáčky motoru
N_v	[-]	počet vláken ve svazku
p_d	[Mpa]	dovolený tlak materiálu
p_m	[Mpa]	měrný tlak
p_n	[Mpa]	měrný tlak náboje
P_m	[W]	měrný výkon
P_p	[W]	požadovaný výkon motoru
R_{op}	[m]	velikost ramena působíště normálové síly

R_r	[N]	celkové radiální zatížení ložiska
R_{rx}	[N]	radiální zatížení ložiska v tečné rovině
R_{rz}	[N]	radiální zatížení ložiska v normálové rovině
R_s	[m]	vzdálenost osy šroubů motoru od hřídele
u	[μm]	posunutí
v_o	[m/s]	obvodová rychlost
v_p	[mm/s]	podélný posuv hlavice
W_k	[mm ³]	průřezový modul v krutu
y_t	[mm]	souřadnice těžiště v ose kartáče
z_t	[mm]	souřadnice těžiště v ose příruby robotu

Δ	[mm]	deformace vlákna
σ_d	[Mpa]	dovolené napětí v tahu
σ_p	[Mpa]	mez průtažnosti materiálu
σ_{vM}	[Mpa]	napětí von Mises
τ_{dk}	[Mpa]	dovolené napětí v krutu
τ_k	[Mpa]	napětí v krutu
τ_{kk}	[Mpa]	mez napětí v krutu
Ω	[rad]	úhel špičky kartáče

Al_2O_3	oxid hlinitý
BaO	oxid barnatý
CaO	oxid vápenatý
HF	kyselina fluorovodíková
K_2O	oxid draselný
MgO	oxid hořečnatý
Na_2O	oxid vápenat
PbO	oxid olovnatý
SiC	karbid křemíku
SiO_2	oxid křemičitý

Úvod

Dosavadní technologie opracování povrchu skla matováním jsou buď nedostatečně produktivní v případě pískování, anebo je nutné odstraňovat nebezpečné odpady ve formě fluoridových zátěží, jak je tomu u chemického matování. Nově patentovaná technologie úpravy povrchu plochého skla mechanickým broušením abrazivním kartáčem zvyšuje produktivitu matování a neaplikuje agresivní chemikálie zatěžující životní prostředí. Tento patentem chráněný technologický proces je použitelný pro matování plochého skla s tloušťkou od 3 mm a vykazuje pozoruhodné vlastnosti. Povrch mechanicky matovaného skla je pevný, nedrolivý, rovnoměrně matný a hedvábně lesklý. Technologii lze realizovat pracovní hlavicí.

Hlavním úkolem předkládané práce je navrhnout technologickou hlavice průmyslového robotu představovanou rotujícím brusným nástrojem nového typu a ověřit reálnost navrženého řešení.

Vlastní práce je rozdělena do pěti kapitol, ve kterých jsou postupně řešeny aspekty problematiky opracování povrchu plochého skla rešeršními studií, dále je navrženo koncepční řešení, a následně zpracováno konstrukční řešení, na které navazuje ověření technických podmínek procesu. Na závěr je provedeno technickoekonomické zhodnocení.

První kapitola předkládá rozbor problematiky matování s důrazem na nově patentovanou technologii. Obsahem této kapitoly je dále stanovení technických požadavků mechanického matování, které vychází z předešlé rešeršní části.

V kapitole druhé jsou předloženy koncepční návrhy využití mechanického matování ve výrobě plochého skla. Dále jsou uvedeny varianty systému mechanického matování s průmyslovým robotem s užitečnou nosností do 16 kg, na které navazují koncepce technologické hlavice a nástroje. Kapitola je zakončena výběrem odpovídajícího pohonu matovacího nástroje a stanovením dodatečných technických podmínek, vycházejících z instalace na robot.

Konstrukční řešení je tématem třetí kapitoly. Je zde předloženo řešení celého matovacího zařízení a konstrukce technologické hlavice. Práce je doplněna o konstrukci periferních zařízení patřících do systému mechanického matování.

Kapitola čtvrtá je založena na výsledcích odzkoušení funkčního vzorku a na jejich základě jsou stanoveny technické podmínky pro efektivní využití této technologie.

V kapitole páté je provedeno technickoekonomické zhodnocení, které přináší popis přínosu nového typu technologické hlavice a vyčíslení nákladů na realizaci.

1. Rozbor procesu mechanického matování

1.1. Rozbor stávajících metod matování

Matování je ve sklářské výrobě jedna z metod zušlechťování skla. Zušlechťování je technologický postup, jehož cílem je dosažení zlepšeného vzhledu výrobku. Tento proces je zaměřen pouze na změnu optických vlastností výrobků a nedochází při něm ke změně jeho tvaru či velikosti. Zušlechťovací metody lze rozdělit dle technologického procesu na fyzikální a chemické.

Fyzikálním přístupem k zušlechťování skla je mechanický či tepelný princip. Mechanického principu se využívá například při omílání, leštění, broušení či mechanickém matování skla. Ke změně vlastností povrchové vrstvy dochází na základě jejího rozrušování abrazivním materiálem, který je součástí těles provádějících zušlechťování. Na tepelném principu je založeno leštění ohněm a nabíhání barev, které spočívá na závislosti povrchového napětí skla na teplotě. Chemickými metodami zušlechťování jsou chemické leštění, leptání, chemické matování a nanášení vrstev na povrch skla. Při působení chemických látek na sklo dochází ke změně chemického složení povrchové vrstvy a tím i k následné změně optických vlastností [1].

Matování skla se v dnešní době provádí technologickými procesy zakládajícími se na použití chemických prostředků či pískování.

Chemické matování je založeno na působení kyseliny fluorovodíkové (HF) na povrch skla, během něhož dochází k rozpuštění jednotlivých složek skla v roztoku. Kyselina fluorovodíková reaguje jak s oxidy alkalických kovů (Na_2O , K_2O), oxidy alkalických zemin (CaO , MgO , BaO , PbO), tak i se sklotvorným oxidem SiO_2 . Vlivem rozrušení mřížky SiO_2 působící kyselinou fluorovodíkovou dochází k prudkému narušování struktury skla. Během matovacího procesu krystalizují na povrchu skla nerozpustné fluorokřemičitany zamezující dalšímu degenerativnímu působení kyseliny fluorovodíkové. Tato vrstva je proto smívána proudem vody, čímž dojde k znovuoživení povrchu skla a kyselina může dále narušovat strukturu skla. Touto metodou lze matovat jak v celé ploše povrchu, tak vzorovaně. Moderní přístup využívá CNC strojů k nanášení krycí vrstvy materiálu, která odolává působení kyseliny fluorovodíkové a vytváří tak konečný vzor. Použití těchto moderních počítačově řízených strojů zvyšuje variabilitu a rychlost celého zušlechťovacího procesu. Mat, vytvořený touto technologií má velice jemnou povrchovou strukturu s mléčným zákalem. Povrch skla je velice dobře čistitelný, jelikož je oprostěn trhlín a záprasků,

ve kterých by mohly utkvát nečistoty a vlhkost. K nevýhodám tohoto postupu patří zejména sklon k mechanickému poškození povrchu, jelikož matováním dojde k snížení jeho tvrdosti. Nelze opomenout nutnost dodržování bezpečnostních předpisů upravujících zacházení s nebezpečnými a agresivními látkami, kterou kyselina fluorovodíková je.

Mechanické matování je nejčastěji realizováno takzvaným pískováním. Podstata této technologie spočívá ve vystřelování abraziva kolmo na povrch skla z trysky. Abrazivní materiál je nesen v proudu stlačeného vzduchu, vytlouká částice z povrchu a zároveň tříští a drtí povrchovou vrstvu. Kombinace těchto změn vede ke zmatnění povrchu skla. Stroje na pískování pracují nejčastěji v uzavřeném režimu, kdy se odsává prach a abrazivo z pracovního prostoru. Abrazivo je dále odděleno od prachu a využito k opětovnému matování. Jako abrazivo bývá využíván korund (Al_2O_3), siliciumpokarbid (SiC) nebo tzv. balotina (sodnodraselnaté skleněné kuličky). Konečné optické vlastnosti vrstvy závisí zejména na velikosti zrn, jejich rychlosti a směru dopadu na povrch. Výsledkem pískování je nepevný povrch s velkým množstvím trhlin a záprasků, postupujících kolmo od povrchu do vnitra výrobku. Tyto povrchové defekty způsobují špatnou udržovatelnost povrchového matu, protože se v nich udržuje vlhkost či mastnota. Další nevýhodou je nízká energetická účinnost této technologie, zejména díky spotřebě tlakového vzduchu, jehož výroba je velice nákladná [1], [2], [3].

1.2. Rozbor mechanického matování plochého skla

Mechanické matování má fyzikální a chemické parametry, které lze ovlivňovat nastavením technických podmínek technologického procesu. Účelem této kapitoly je teoretický rozbor mechanického kartáčování, který bude podkladem pro stanovení technických podmínek.

1.2.1. Princip kartáčování

Kartáčování je velice produktivní proces používaný jako dokončovací operace v průmyslové výrobě. Nejčastějšími příklady jeho použití jsou broušení, leštění, čištění hran a vytváření textur. Přednostmi technologického procesu kartáčování jsou zejména jeho vysoká flexibilita, nízké provozní náklady a malá prostorová zástavba kartáčovacích zařízení. Díky těmto vlastnostem byla technologie kartáčování zavedena i v případě zušlechťování plochého skla.

Výsledná struktura matovaného povrchu se odvíjí od materiálu vláken kartáčů, jejich délky, průměru a obvodové rychlosti. V menší míře je výsledek kartáčování také

závislý na stylu kartáčování, tvaru vláken, na druhu a množství chladicí kapaliny, podélném posuvu, materiálu brusných zrn, jejich velikosti a rozložení.

Tato dokončovací technologie se používá v širokém rozsahu nastavení technologických podmínek a použitém druhu materiálu nástroje. Jednotlivá vlákna jsou nejčastěji vyrobena z ušlechtilé oceli. Dalšími často používanými materiály jsou neželezné slitiny stříbra, mědi, niklu a další tepelně a korozi vzdorné slitiny. Vedle kovových slitin jsou využívány syntetické materiály jako nylon či propylen. Již méně častým materiálem jsou zvířecí či rostlinná vlákna, například to mohou být koňské žíně či vlákna rostliny Tampico. Nylonová vlákna jsou nejčastěji používaným materiálem, zejména díky své chemické odolnosti, přiměřené odolnosti vůči tření a dobrým elastickým vlastnostem. Vlákna si zachovávají svůj tvar i po několikanásobném pravidelném ohýbání během procesu kartáčování. Vlastnosti nylonových vláken jsou zachovány do teploty 60°C, při které dochází k snížení tuhosti vláken. Syntetická vlákna obsahují zrna korundu nebo silikon karbidu. Silikon karbid se vyznačuje vysokou tvrdostí a tuhostí. Tyto vlastnosti tak předurčují tento materiál k použití při efektivním kartáčování kovů. Vlákna s příměsí korundu jsou využívána pro dokončovací operace. Kromě těchto standardních druhů zrn se objevují dále materiály jako hliníkový silikát či diamant. Speciálním druhem materiálu je také syntetický diamant, který je využíván pro svoji tepelnou stálost, tvrdost a odolnost proti opotřebení. Zrna jsou ve vláknech pravidelně rozložena v poměrném množství od 20 do 40 %. Kartáčování syntetickými vlákny se dá provádět buď na sucho anebo s chladicí kapalinou. Chladicím médiem je nejčastěji voda nebo minerální olej. Přivádění kapaliny umožňuje použití až dvojnásobné zatěžující síly během kartáčování, jelikož její přítomnost rapidně snižuje součinitel tření mezi povrchem vlákna a kartáčovaným plochou. Tvar průřezu jednotlivých vláken je běžně kruhový, ale může být i oválný či obdélníkový. Tato vlastnost ovlivňuje zejména velikost styčné plochy vlákna.

Účinnost kartáčování je zvyšována použitím kartáčů s větším průměrem vláken, (od 0,4 do 1,3 mm), s kratšími ohýbanými nebo spletenými vlákny, s velkou šířkou a vyšší hustotou vláken. Zvyšující efekt na tuhost vlákna, tedy účinnost kartáčování má také obvodová rychlost kartáče. Teoretická tuhost kartáče je vyjádřena, deformací obecného vlákna dle rovnice

$$\Delta = \frac{F_{zv} \cdot l_{cv}^3}{3 \cdot E_v \cdot J}, \quad (1.1)$$

kde Δ je velikost deformace [mm], F_{zv} je zatěžující síla vlákna [N], $l_{\zeta v}$ je činná délka vlákna [mm], E_v je modul pružnosti vlákna [MPa] a J_v je moment setrvačnosti průřezu vlákna [mm]. Pro vlákna kruhovitého průřezu uspořádaných do svazků je rovnice (1.1) transformována do tvaru rovnice

$$\Delta = \frac{F_{zv} \cdot l_{\zeta v}^3}{0.1473 \cdot E \cdot D_v^4 \cdot N_v}, \quad (1.2)$$

kde D_v [mm] je průměr vlákna a N_v je počet vláken ve svazku. Rovnice tak vyjadřuje závislost průměru a délky vlákna na jeho celkové deformaci [4].

1.2.2. Vznik a budoucí rozvoj mechanického matování plochého skla

Mechanické matování, takzvané kartáčování, kterým se rozumí rozrušování a zdrsňování skla působením speciálních rotujících kartáčů, je zcela nová technologie zušlechťování plochého skla. Tento inovovaný přístup byl vynalezen Ing. Čapkou, který tento zušlechťovací postup nechal patentovat v roce 2010 pod názvem Způsob úpravy povrchu plochého skla a zařízení k provádění tohoto způsobu (CZ 302636 B6). V dnešní době je tato technologie ve fázi vývoje ve spolupráci firmy SKLOPAN LIBEREC, a.s. a Technické univerzity v Liberci. Tato metoda matování nenarušuje povrch skla do velké hloubky, vytváří velice kvalitní stejnoměrný matovaný povrch se sametovým optickým jevem. Zároveň je možné touto metodou vytvářet široké množství matovaných vzorů. Další nespornou výhodou je ekologický přístup k matování skla, jelikož v tomto případě odpadá likvidace nebezpečného odpadu, vzniklého během technologického procesu matování. V budoucnu se očekává hromadné nasazení tohoto principu, pojmenovaného firmou SKLOPAN jako Ecosphere a to hned z několika důvodů. Výrobcům skla by mělo zařízení na tomto principu přinést v porovnání s dnešními metodami matování následující výhody:

- 70% úspora energetických výdajů
- 60% úspora pracovního prostoru – kompaktní rozměry zařízení a s tím spojená úspora pracovního prostoru, by měly vést k finanční úspoře či uvolnění pracovního prostoru jiným technologiím
- 50% úspora investičních nákladů – díky jednoduchosti zařízení, by měly značně poklesnout náklady spojené s pořízením tohoto systému
- 50% úsporu lidské práce – vysoce efektivní automatický proces s jednoduchou operační náročností, snižuje požadavky na množství obsluhy inovovaného matovacího zařízení

- 30% úspora výrobních nákladů – této úspory je dosaženo zejména díky značné jednoduchosti principu mechanického matování kartáčováním [5], [6]

1.2.3. Obecný rozbor mechanického matování plochého skla

Pod pojmem kartáčování plochého skla se rozumí působení brusných zrn syntetického diamantu na jeho povrch. Zrna syntetického diamantu jsou umístěna v plastových vláknech, která jsou vsazena do děr radiálně umístěných na válcové ploše kartáče. Rotací kartáče dochází k napřímení vláken vlivem odstředivé síly. Vlákně se pohybuje při rotaci po kruhové dráze v rovině kolmé na osu rotace. Brusná zrna dopadají na povrch skla a pohybují se po něm po krátkých přímých drahách. Vlivem dostatečné kinetické energie brusných zrn dochází k vyražení skleněných částic z povrchu skla. Odpovídající velikostí obvodové rychlosti vlákna je hodnota $v_o = 25 - 35 \text{ ms}^{-1}$. Rozrušováním povrchu vznikají v jeho struktuře lasturové lomy nepřesahující délku 0,02 mm a hloubku 0,005 mm. Celý technologický proces probíhá při současném chlazení povrchu a nástroje kapalinou. Dalším účelem přítomnosti kapaliny je čištění povrchu skla od skleněného prachu vzniklého odebráním materiálu. Bez použití chlazení by mohlo sklo praskat vlivem přechodného napětí, které je způsobeno právě změnou teploty skla. Výsledná struktura matovaného povrchu je závislá zejména na velikosti brusných zrn, jejich koncentraci, délce vláken, tvaru vláken a obvodové rychlosti.

Na základě výzkumu Inovace strojů a zařízení a implementace pokročilých technologií do procesu automatické výroby a zpracování plochého skla provedeného na Ústavu pro nanomateriály, pokročile technologie a inovace Technické univerzity v Liberci byly stanoveny podmínky pro konstrukci a výrobu kartáčů. Průměr kartáče byl stanoven na velikost $D_k = 200 \text{ mm}$, s činnou délkou vláken $l_{\text{čv}} = 50 \text{ mm}$ a jejich průměrem $D_v = 0,4 \text{ mm}$. Nejvýhodnější technologií výroby kartáče je způsob lepení snopků do otvorů. Snopky jsou vytvořeny protažením kuželovou šablonou, dále je jejich konec lisován a spojen epoxidovým lepidlem. Tento přístup je výhodný díky vysoké pevnosti snopků v otvorech, jejich variabilitě uspořádání a velké hustotě vláken [7].

1.2.4. Výhody mechanického matování plochého skla

Ing. Čapka ve svém vynálezu [2] uvádí výhody, které tato technologie přináší v porovnání se zavedenými způsoby matování plochého skla. Působením abrazivního materiálu na skleněnou plochu vzniká na jeho povrchu hustá síť lasturových lomů. Na této soustavě lomů dochází k rozptylu světla, což se projevuje matným optickým

efektem. Výhodou kartáčování jsou zlepšené užité vlastnosti finálního povrchu plochého skla v porovnání s ostatními matovacími postupy a to zejména díky odlišné struktuře povrchové vrstvy. Charakter kontaktu brusných zrn a povrchu, dráha brusného zrna a neméně tvrdost brusiva ovlivňují výsledný vzhled kartáčované plochy. Kartáčování má charakter broušení, nikoliv vytloukání či drcení. Díky tomu se tvoří v povrchové vrstvě, s ním rovnoběžné, mělké lasturové lomy, které jsou vzájemně propojeny rovnými plochami. Jednotlivé plochy jsou překryty sítí jemných a rovnoběžných brusných stop. Tato struktura způsobuje rovnoměrně matný a hedvábný lesklý vzhled kartáčovaného povrchu. Důležitými finálními vlastnostmi povrchu jsou také jeho pevnost a nedrolivost. Díky vzniku pouhých mělkých lomů, pronikajících do malé hloubky je povrch jen minimálně mechanicky narušen a lze tak využít tuto technologii jak na tepelně nezpracované, tak i kalené sklo. Další výhodou vyplývající z minimálního narušení povrchu je jeho konečná tvrdost, která je shodná s tvrdostí hlubších vrstev. Jemná struktura lasturových lomů je minimálně nasákavá pro kapaliny, což usnadňuje udržování čistého povrchu, díky tomu je kartáčované sklo vhodné i pro externí aplikace. Technologie kartáčování je aplikovatelná jak na konečné výrobky, tak na polotovary či ploché sklo ještě před jeho dělením na finální rozměry. Kartáčováním částečně zakrytého povrchu fóliemi lze dosáhnout rozmanitých kombinací čirých a matných ploch. Mezi další výhody patří dle vynálezce energetická účinnost, ekologičnost, bezprašnost a nízké množství vzniklého odpadu.

1.2.5. Provedení matovacího zařízení

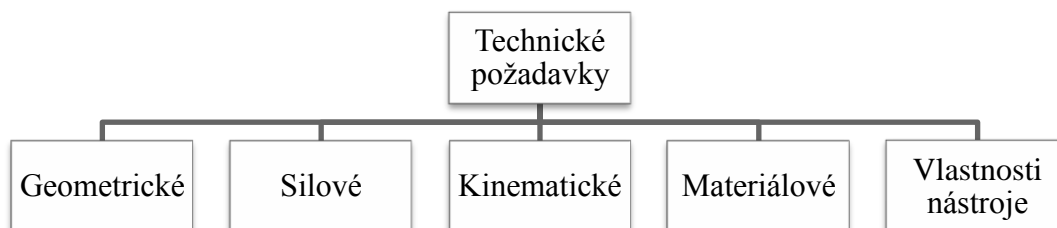
Zařízení k matování plochého skla rotujícím kartáčem může mít uspořádání jak horizontální, tak vertikální. Jedno z možných uspořádání zařízení se skládá z rámu, na kterém je umístěna skleněná tabule, držena v pevné pozici vakuovými přísavkami. Na portálu či rámu jsou umístěny matovací kartáče a jejich pohon, které tvoří jeden celek – matovací hlavici. Tato soustava se pohybuje v příčném i podélném směru k povrchu skla. Součástí zařízení je také odpadní vana, která zachytává odpadní chladicí kapalinu.

Další možným provedením je dvoustupňová matovací hlavice. Zařízení je osazeno kartáčem hrubovacím a kartáčem určeným k jemnějšímu matování povrchu. Do záběru se nejprve dostává kartáč hrubovací a posléze kartáč určený k jemnému matování. Opačnou variantou je pevné uložení matovací hlavice, kde se pohybuje skleněná tabule [2].

Všechny uvedené majoritní výhody mechanického matování by měly napomoci budoucímu prosazení této technologie v produkci matovaného skla zejména v oblasti designu, ve kterém jsou kladeny stále vyšší požadavky na rozmanitost tvarů a optických vlastností matované plochy. Kartáčovací zařízení by mohlo být umístěno buď jako samostatný celek mimo výrobní linku plochého skla, nebo by mohlo být do ní přímo zařazeno. Samostatně pracující zařízení s přetržitým pracovním cyklem by mělo být využíváno pro výrobu individuálních či složitých matovaných struktur, které vyžadují delší technologický čas a větší počet následných technologických. Naopak umístění matovacího zařízení přímo do výrobní linky by se stalo vysoce produktivním způsobem výroby matovaného plochého skla. Podmínkou pro nasazení této technologie je jednoduchost matovaných vzorů a jejich nízká časová náročnost. Nosným prvkem matovací hlavice může být portálový manipulátor, pohyblivý ve směru kolmém a příčném k povrchu skleněné tabule, využívaný k vytváření nejjednodušších vzorů. Dalším sofistikovanějším zařízením, na které lze umístit matovací hlavici je CNC obráběcí centrum, které již může zajišťovat výrobu tvarově složitějších matovaných prvků a to jak samostatně umístěné zařízení či zařazené do výrobní linky. Nosným prvkem pro nejnáročnější a nejsložitější aplikace matování je průmyslový robot, který by díky svým výhodným vlastnostem přesnosti, opakovatelnosti a rychlosti polohování umožnil výrobu teoreticky neomezených tvarů matovaných obrazců s vysokou reprodukovatelností. Omezením v tomto případě je technologie tvorby a oddělení čírych a matných ploch. Oddělení lze provést například zakrytíváním čírych ploch.

1.3. Technické požadavky mechanického matování

Proces mechanického matování je závislý, podobně jako u technologie broušení, na vlastnostech brusného nástroje a na technologických podmínkách procesu. Výsledná struktura matovaného povrchu se odvíjí od velikosti zrn a jejich hustoty ve vláknech. Neméně důležitou hodnotou je obvodová rychlost nástroje, která do značné míry ovlivňuje velikost kinetické energie brusných vláken. Na základě předchozího výzkumu mechanického matování a na základě výsledků zkoušek prováděných na experimentálním matovacím zařízení byly stanoveny následující technické požadavky na konstrukci matovací hlavice [7]. Podle rozboru bylo sestaveno rozdělení požadavků dle obr. 1.



Obr. 1 Rozdělení technických požadavků na konstrukci matovací hlavy

Geometrické technické požadavky

- Rozměry – časté uplatňovaná šíře vzorů 30 až 70 mm, určuje velikost účinného povrchu kartáče. Dalším rozměrem je průměr kartáče D_k [mm], na jehož velikosti závisí obvodová rychlost vláken s abrazivy (v_o [m/s]) a to dle vztahu

$$v_o = \omega \cdot \frac{D_k}{2} = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_k}{60}, \quad (1.3)$$

kde n_k [min^{-1}] je počet otáček kartáče a D_k [mm] je průměr kartáče. Požadované obvodové rychlosti $v_o = 25 - 35$ m/s a uvažované frekvenci otáčení kartáče $n_k = 3000 \text{ min}^{-1}$ odpovídá průměr matovacího nástroje $D_k = 160 - 220$ mm.

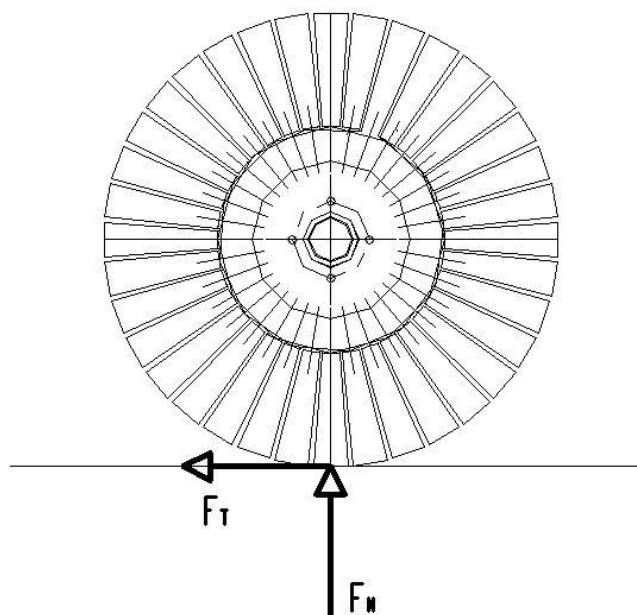
- Geometrie matovaného okraje – vzhledem k požadavku matování obrazců je nutné zajistit tuhost okraje kartáče tak, aby zajišťoval tvorbu ostrého rozhraní bez přechodu čiré a matované plochy. Díky vhodné obvodové rychlosti vláken, lze předpokládat, že vlákna budou udržovat přímý směr bez přídavné podpory. Další závěry budou vyvozeny z dalšího výzkumu technologie mechanického matování.

Silové technické požadavky

- Silové zatížení – měřením na experimentálním matovacím zařízení bylo stanoveno silové zatížení kartáče. Dle výsledků převzatých ze zprávy výzkumu vzniká v rovině kolmé na osu nástroje normálová síla o velikosti $F_N = 70 \text{ N/100 mm}$ šíře kartáče a v rovině kontaktu nástroje a skla vzniká třecí síla o velikosti $F_T = 14 \text{ N/100 mm}$ šíře kartáče [7]. Velikost těchto sil byla změřena při zanoření kartáče 1,5 mm a otáčkové frekvenci $n_k = 3000 \text{ min}^{-1}$. Výslednici sil působících v radiální rovině kartáče šíře 50 mm je možné vyjádřit rovnicí

$$F_R = \sqrt{F_N^2 + F_T^2} = \sqrt{35^2 + 7^2} = 35,7 \text{ N}. \quad (1.4)$$

Silový účinek v axiálním směru kartáče je při kolmém pohybu na jeho osy zanedbatelný. Silové zatížení kartáče je zobrazeno na obr. 2.



Obr. 2 Silové zatížení kartáče

- Krouticí moment – měřením na experimentálním matovacím zařízení, byl stanoven měrný činný krouticí moment $M_{\text{č}} = 1 \text{ Nm}/100 \text{ mm}$ šíře kartáče. Měření bylo realizováno při hloubce zaboření kartáče $1,5 \text{ mm}$, obvodové rychlosti $v_o = 32 \text{ m/s}$, odpovídajících otáčkách $n_k = 3000 \text{ min}^{-1}$ a podélném posuvu $v_p = 75 \text{ mm/s}$ [7]. Vzhledem k šířce kartáče 50 mm , je požadovaný činný krouticí moment $M_{p\text{č}} = 0,5 \text{ Nm}$. Na základě uspořádání jednotlivých variant konstrukce nelze opomenout ani ztrátový moment, který je v konkrétním případě nutné započítat do požadovaného jmenovitého momentu pohonu.
- Výkon – na základě požadovaného krouticího momentu a otáček kartáče, lze stanovit velikost požadovaného výkonu pohonu P_p [W] ze vztahu

$$P_p = \omega \cdot M_{p\text{č}} = 2 \cdot \pi \cdot n_k \cdot M_{p\text{č}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1 = 314 \text{ W}. \quad (1.5)$$

Kinematické požadavky

- Obvodová rychlost – je jedním z důležitých parametrů kartáčování. Na základě odborného rozboru a dle výsledků měření na experimentálním matovacím zařízení je dosaženo optimálního matovaného povrchu při rychlosti $v_o = 25 - 35 \text{ m/s}$ [7]. Obvodová rychlost je reprezentována velikostí kartáče, tedy průměrem D_k [mm] a velikostí frekvence otáček n_k [min^{-1}]. Nominální otáčky pohonu by se dle velikosti kartáče měly pohybovat v hodnotách $n_n = 3000 - 3500 \text{ min}^{-1}$. Vzhledem k různým mechanickým vlastnostem spektra uvažovaných skel,

zejména jejich tvrdosti, bude v souladu se změnou těchto vlastností nutné měnit i velikost kinetické energie brusných zrn rozrušujících skleněný povrch. Těto změny bude dosaženo nastavením velikosti obvodové rychlosti, tedy frekvence otáček či změnou průměru kartáče. Z toho plyne požadavek na plynulé nastavení otáček kartáče.

Materiálové požadavky

- Tuhost konstrukce – je ovlivněna jak tvarem rámu, tak i výběrem materiálu. Je proto nutné dbát na výběr dostatečně tuhého materiálu, případně provést výpočet napětí pomocí metody konečných prvků.
- Hmotnost – celková hmotnost hlavice je limitována maximální nosností pohybového zařízení, tím může být průmyslový robot nebo CNC zařízení
- Chemická odolnost – konstrukce hlavice bude vystavena účinkům chladicí kapaliny, a proto je dalším požadavkem dostatečná korozivzdornost použitých materiálů.

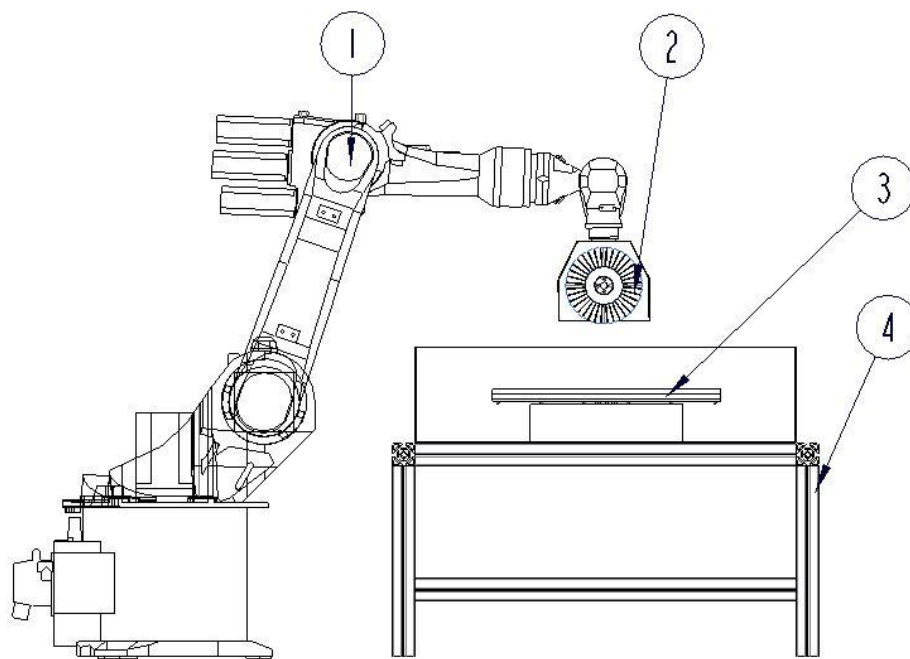
Vlastnosti nástroje

- Kompaktnost – v případě dodržení relativně malých rozměrů celé matovací hlavice ji lze s výhodou umístit na jakékoliv nosné zařízení, včetně těch s malou prostorovou zástavbou.
- Vyměnitelnost nástroje – na základě různorodých požadavků na tvar či optické vlastnosti matovaných ploch je nutné vyměňovat kartáč s různými vlastnostmi vláken, abrazivních částic či jeho různými základními rozměry. Výměna nástroje by měla být snadná a rychlá.
- Životnost – neméně důležitou vlastností každého strojního zařízení je jeho životnost. Faktory ovlivňující životnost jsou provozní podmínky, tuhost a tvar konstrukce. V případě matovací hlavice je zde nebezpečí snížení životnosti zejména účinkem chladicí kapaliny. Motor by měl být chráněn před stříkající kapalinou vhodnými konstrukčními prvky. Případně lze vybrat motor s dostatečnou odolností proti stříkající vodě. Podle stupnice IP by měl mít takovýto motor nejméně stupeň krytí IP 66.

2. Konceptní návrh technologické hlavice

2.1. Koncepce instalace hlavice do systému

Matování skla je realizováno matovací hlavicí, která je nesena pohybovým zařízením. Tím může být jednoduchý jednoúčelový manipulátor ale i průmyslový robot s několika stupni volnosti. Koncepce tohoto zařízení se odvíjí od velikosti skla a složitosti matovaných vzorů. Je zřejmé, že v případě matování kusového skla musí být tabule v systému fixována v neměnné pozici tak, aby byla zaručena přesnost výsledného matování. K tomuto účelu lze využít vakuové techniky, u které lze jednoduše vyvodit úchopnou sílu podtlakovým způsobem. V případě nasazení mechanického matování přímo do výrobní linky plochého skla, je sklo v kontinuálním pohybu pod matovací hlavicí. Toto umístění by vyžadovalo vysoce produktivní technologický proces matování tak, aby byla zaručena dostatečná účinnost matování při jednom průchodu skla pod matovací hlavicí.

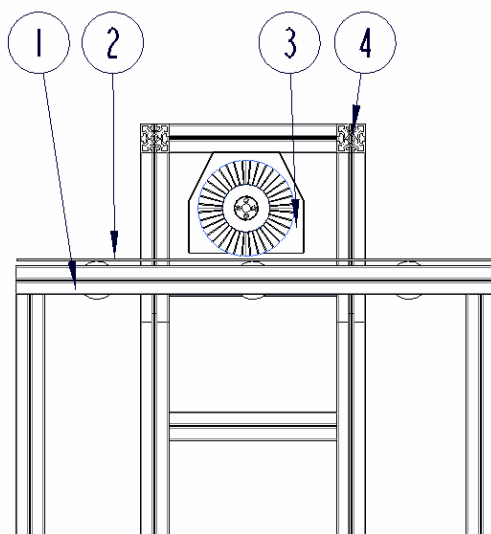


Obr. 3 Izolované matovací zařízení

Z provedených zkoušek mechanického matování vyplývá, že je zatím nutné matovat plochu vícenásobně, aby bylo dosaženo kvalitního optického výsledku [7]. Ploché sklo je tak výhodnější matovat na izolovaných zařízeních stojících mimo výrobní linku. Sklo musí být dopraveno k zařízení a dochází tak ke kumulaci přepravního času, čímž je prodlužována celková doba výroby skla. K polohování technologické hlavice lze využít průmyslový robot, pomocí něhož lze vyrobit nejen

rovnoměrný mat ale i více segmentové a složité matované vzory. Varianta takového uspořádání je na obr. 3. Izolované matovací zařízení se skládá z průmyslového robotu 1, matovací hlavičky 2, držáku plochého skla 3 a rámu 4. Nevýhodou tohoto systému by mohla být nepřesnost polohování koncového členu robotu. Dle průvodní dokumentace robotu KUKA KR 16, je přesnost polohování koncového členu $\pm 0,05$ mm [8]. Hloubka zanoření kartáče do povrchu skla se pohybuje podle výsledku provedeného měření na Ústavu pro nanomateriály, pokročile technologie a inovace Technické univerzity v Liberci od 1 mm do 2 mm [7]. Lze tak předpokládat, že nepřesnost polohování může způsobit odlišnost úrovně matu na povrchu.

Jak bylo uvedeno výše, perspektivním řešením je umístění hlavičky do linky na výrobu velkoformátového plochého skla. Zjednodušenou manipulací je zkrácen celkový výrobní čas a použití této varianty se tak jeví jako velice produktivní. Matovací hlavičku lze umístit na rám nad válečkovou dráhu výrobní linky a sklo je tak matováno hlavičkou, která se pohybuje pouze v příčném směru pásu skla. V případě tohoto uspořádání matovacího zařízení ale není možné vytvářet velkého množství tvarově odlišných vzorů jako v u výše uvedené varianty. Tato nevýhoda je způsobena zejména nižší pohyblivostí matovací hlavičky a zejména kratším technologickým časem vzhledem k pohybu skla na válečkové dráze. Podmínkou budoucího nasazení této varianty je zvýšení účinnosti kartáčování, které je tématem dalšího výzkumu této technologie. Koncepce zařízení umístěného v lince je zobrazena na obr. 4. Zařízení se skládá z válečkové dráhy 1, na které se pohybuje pás skla 2 a dále z matovací hlavičky 3 umístěné na portálovém rámu 4.



Obr. 4 Matovací zařízení zařazené do výrobní linky

Podobnou variantou je využití stejného uspořádání matovacího pracoviště, kde by sklo bylo umístěno v zařízení staticky na základě využití úchopného prvku. Matovací hlavice by byla umístěna na portálu pohybujícím se nad rovinou skla. Lze usuzovat, že vhodnou konstrukcí portálu by bylo dosaženo vysoké přesnosti polohování. Vhodnou konstrukcí je myšlen rám s vysokou tuhostí osazen servopohony s vysokou přesností polohování.

2.2. Koncepce matovací hlavice zkušebního zařízení

Úkolem této diplomové práce je konstrukční řešení experimentální matovací hlavice s předpokládanou instalací na průmyslový robot KUKA KR 16, který je k dispozici v laboratořích Katedry sklářských strojů a robotiky Technické univerzity v Liberci k dispozici. I přes uvedené specifikace zařízení skýtá jeho návrh velké množství variant jak uspořádání celého pracoviště, tak samotné konstrukce matovací hlavice. Níže uvedené rozdělení na obr. 5 zobrazuje varianty zkušebního zařízení.



Obr. 5 Schéma koncepcí matovacího zařízení

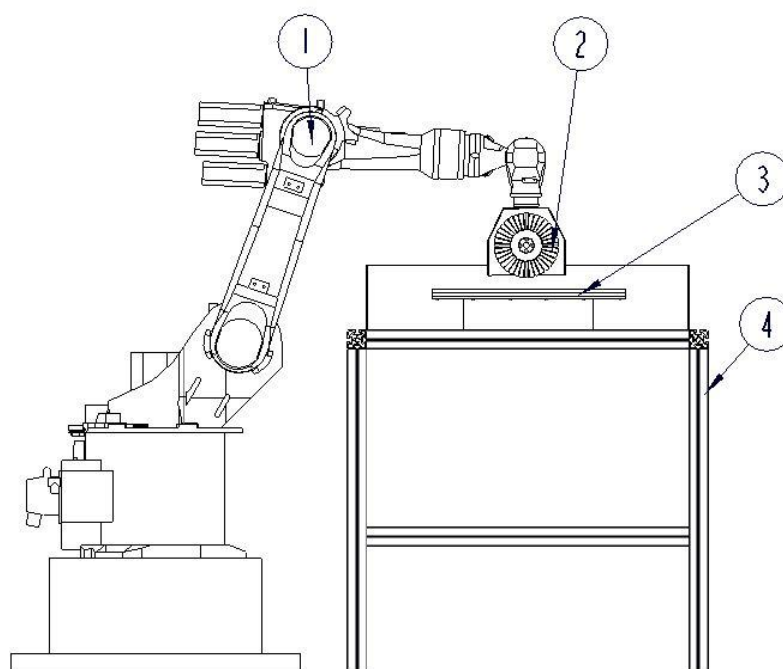
2.2.1. Koncepce systému technologické hlavice s robotem KUKA KR 16

Z výše uvedeného rozdělení vyplývají možné varianty instalace hlavice do systému, které vznikají kombinacemi pohyblivosti hlavice a směru matování povrchu. Jednotlivé koncepce jsou popsány včetně výčtu jejich kladů a záporů a porovnány s variantami ostatními.

Varianta 1 – Pohyblivá matovací hlavice – obrábění shora

Tato varianta je reprezentována systémem s matovací hlavicí nesenou průmyslovým robotem a sklem pevně fixovaným v systému. Obráběná je horní plocha skla. Tento systém je tak variantou s pohyblivou hlavicí a směrem matování povrchu shora.

V systému jsou robot a rám s vanou na odpadní vodu umístěny na podložce tak, jak je uvedeno na obr. 6. Robot 1 je osazen matovací hlavicí 2. K rámu je připevněna vana 4, ve které je umístěn podtlakový úchopný prvek 3, během technologického procesu je sklo fixováno ve stále pozici.



Obr. 6 Varianta 1 – Pohyblivá matovací hlavice – obrábění shora

Hlavní výhodou tohoto systému je jeho menší nárok na zástavbový prostor. V pohybu je pouze matovací hlavice malých rozměrů, což snižuje i nároky na pracovní prostor robotu. Matovací hlavicí je možné polohovat do pozice mimo pracovní prostor zařízení, kde lze provádět její údržbu či výměnu technologického nástroje. Vzhledem k tomu, že je sklo umístěno přímo ve vaně, nedochází k znečišťování okolního prostoru odpadní vodou. Chlazení povrchu a nástroje je v tomto případě velice účinné, protože se

chladicí voda udržuje po delší čas v matované části povrchu. Sklo lze jednoduše polohovat a zafixovat v systému, jelikož úchopný prvek je umístěn v ergonomické pozici. Dle předběžného návrhu má matovací hlavice hmotnost $m_h = 6$ kg. Díky nízké hmotnosti nesené robotem nedochází k namáhání orientačního ústrojí robotu velkým klopným momentem. Silový účinek vzniklý při obrábění, a to zejména normálová síla F_N , působí v ose příruby robotu. Díky tomu nedochází, ke vzniku velkého ohybového momentu od účinku síly F_N na přírubu. Dále normálová síla F_N působí proti tíhové síle hlavice F_{Gh} [N] a výsledné silové zatížení F_v [N] hlavice je podle rovnice [9]

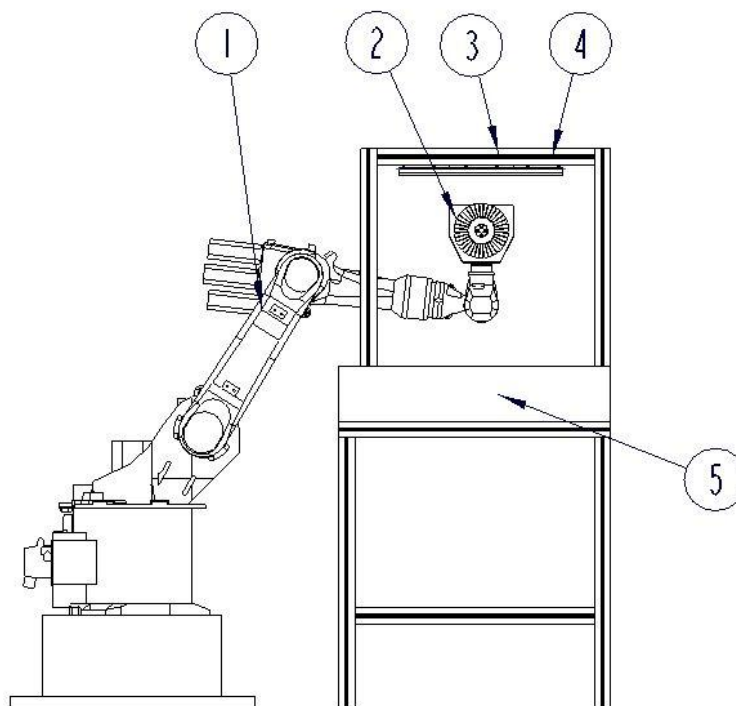
$$F_v = F_{Gh} - F_N = 59 - 35 = 24 \text{ N}, \quad (2.1)$$

$$F_{Gh} = m_h \cdot g = 6 \cdot 9,81 = 58,86 \text{ N} \doteq 59 \text{ N}. \quad (2.2)$$

Varianta 2 – Pohyblivá matovací hlavice – obrábění zdola

Tato varianta systému je kombinací pohyblivé hlavice a směru matování povrchu zdola. Hlavice se v systému pohybuje pomocí průmyslového robotu a matuje spodní povrch skla.

Schéma uspořádání systému je uvedeno na obr. 7. Robot 1 i rám s vanou 5 jsou umístěny na podložce jako v předchozím případě. Na rozdíl od předchozí varianty je tato opatřena závěsným rámem 4, který slouží k připevnění podtlakového úchopného prvku 3. Matovací hlavice 2 přichází do kontaktu se spodním povrchem skla.



Obr. 7 Varianta 2 – Pohyblivá matovací hlavice – obrábění zdola

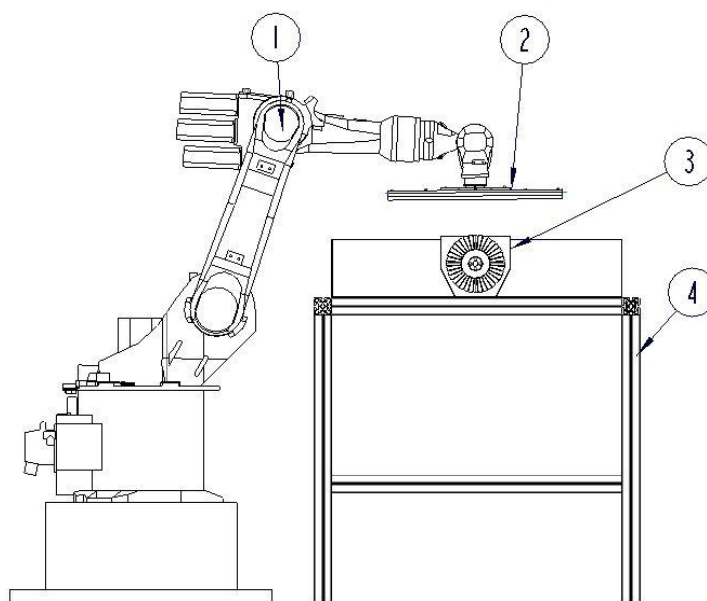
Stejně jako v předchozí variantě lze jednoduše polohovat hlavici mimo pracovní prostor zařízení a zajistit jednoduchou výměnu nástroje. Vzhledem ke konstrukci závěsného rámu je v tomto systému omezen pracovní prostor stroje a nelze polohovat hlavici do pracovní pozice ze všech směrů. Konstrukce závěsného rámu také značně zvyšuje požadavek na zástavbový prostor systému. Dalším nevýhodou systému je obtížné polohování tabule skla na úchopný podtlakový prvek. V tomto případě lze také předpokládat nižší účinnost chlazení povrchu skla a nástroje, jelikož chladicí voda nezůstává v matované části povrchu, ale odtéká pryč. Směs chladicí kapaliny by do velké míry znečišťovala okolní prostor, protože ji nelze zachytit do odpadní vany. Systém tak bude muset být umístěn v uzavřeném pracovním prostoru, který ale omezuje pracovní prostor zařízení. Silové zatížení hlavičky je zde obdobné jako u varianty 1. Rozdílné je skládání silových účinků v ose příruby, kde normálová a tíhová síla hlavičky mají shodný směr a jejich velikosti se sčítají podle vztahu

$$F_v = F_{Gh} + F_N = 59 + 35 = 94 \text{ N.} \quad (2.3)$$

Varianta 3 – Stacionární matovací hlavice – obrábění zdola

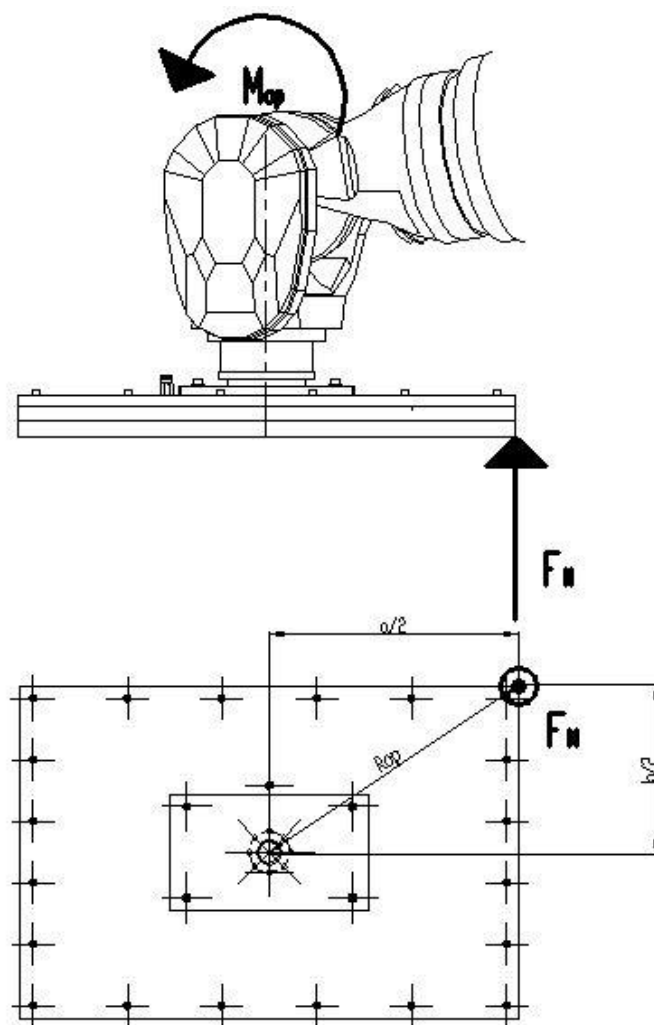
Matovací hlavice je v případě této varianty uspořádání systému umístěna nepohyblivě na rámu a sklo je nesené podtlakovým úchopným prvkem instalovaným na robotu. Matování je realizováno zdola ve směru k matovanému povrchu.

Schématické uspořádání systému je zobrazeno na obr. 8. Robot 1 je částí systému, která zajišťuje pohyb skla spojeného podtlakovou silou s úchopnou hlavicí robotu 2. Matovací hlavice je pevně spojena s vanou 4.



Obr. 8 Varianta 3 – Stacionární matovací hlavice – obrábění zdola

Vzhledem k pevné pozici matovací hlavice v tomto uspořádání je zjevná jeho horší dostupnost pro případ potřeby výměny nástroje, než tomu je u variant s pohyblivě umístěnou hlavicí. Naopak lze pomocí robotu odnámat skleněné tabule např. z palety. Vzhledem k předpokladu častější manipulace se sklem než s nástrojem je tato skutečnost značnou výhodou oproti systému s pohyblivou matovací hlavicí. Sklo lze polohovat k matovacímu nástroji ve všech směrech. Problém s účinností chlazení je obdobný jako u předchozí varianty. Podle návrhu podtlakového prvku ve formě sendvičového uspořádání desek je jeho hmotnost $m_p = 10$ kg. Nesená hmotnost robotem narostla o 4 kg oproti variantám s pohyblivou matovací hlavicí. Normálová síla F_N nemá konstantní místo působení v ose nástroje, jak tomu je u dvou předešlých variant, ale mění se s pozicí hlavice. V závislosti na vzdálenosti od osy příruby robotu vzniká klopný moment M_{op} [Nm]. Výpočet velikosti M_{op} je proveden pro sklo o rozměrech 600x400 mm ($a \times b$) a polohu hlavice v nejvzdálenější pozici od osy příruby jak je uvedeno na obr. 9.



Obr. 9 Zatížení podtlakové desky silou F_N

Velikost ramena R_{op} [m] působící síly F_N [N] vzhledem k ose příruby robotu je stanovena podle rovnice (2.4)

$$R_{op} = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \sqrt{0,3^2 + 0,2^2} = 0,36 \text{ m.} \quad (2.4)$$

Ohybový moment M_{op} je podle vztahu (2.5) součinem normálové síly a vzdálenosti jejího působíště R_{op} [m]

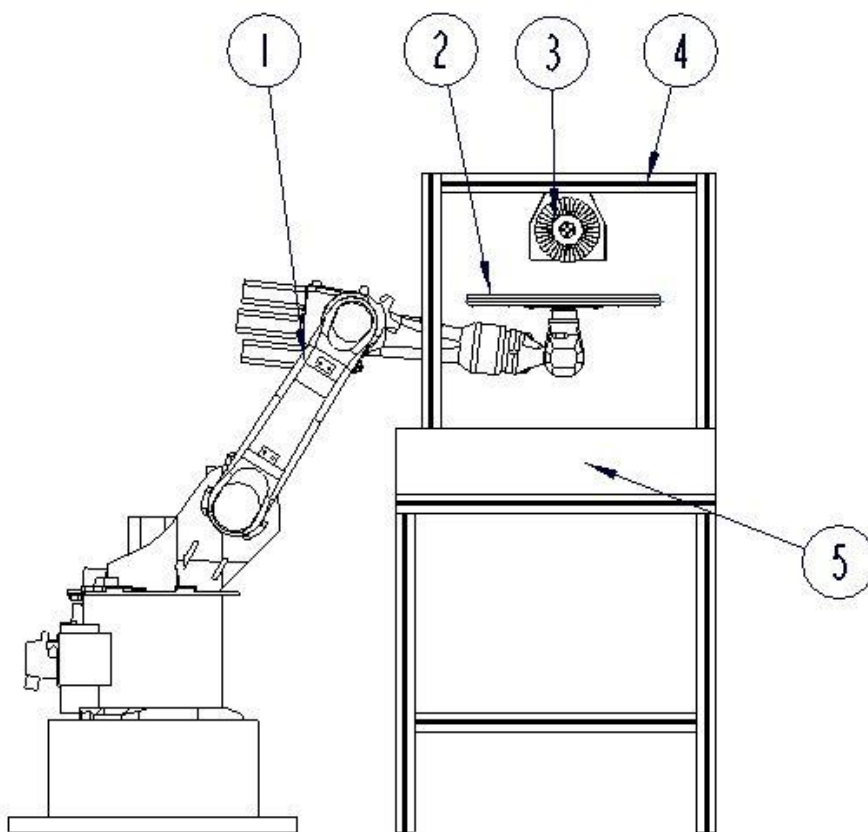
$$M_{op} = F_N \cdot R_{op} = 35 \cdot 0,36 = 12,6 \text{ Nm} \quad (2.5)$$

Z uvedeného kontrolního výpočtu vyplývá nežádoucí momentové zatížení polohovacího a orientačního ústrojí robotu o velikosti $M_{op} = 12,6 \text{ Nm}$.

Varianta 4 – Stacionární matovací hlavice – obrábění shora

Tato varianta reprezentuje koncepci s matováním horního povrchu se staticky umístěnou matovací hlavici a pohyblivou podtlakovou deskou se sklem.

Uspořádání systému je zobrazeno schématicky na obr. 10. Robot 1 je osazen podtlakovou úchopnou hlavici 2, jejímž prostřednictvím je realizováno polohování skla k matovací hlavici 3 pevně fixované k rámu 4. I v této verzi systému je záchytná vana na odpadní vodu umístěna na pevném rámu 5.



Obr. 10 Varianta 4 – Stacionární matovací hlavice – obrábění shora

Tato varianta má díky pohyblivé podtlakové úchopné hlavici stejnou výhodu jako varianta 3, kterou je automatické odebírání skla ze stohovacího místa. Vzhledem k umístění hlavice na závěsném rámu zde vzniká stejný problém jako v případě varianty 3, kterým je obrábění v uzavřeném prostoru. Působením normálové síly na desku vzniká ohybový moment o stejné velikosti jako v případě předchozí varianty.

Pro účely odzkoušení funkčního vzorku technologické hlavice bude využito uspořádání systému dle varianty 1. Toto pracoviště již je instalováno v laboratoři robotických soustav Katedry sklářských strojů a robotiky Technické univerzity v Liberci. Uvedené varianty však podrobněji rozebírají odlišné přístupy uspořádání experimentálního technologického pracoviště a mohou být využity při koncipování nového typu matovacího pracoviště pro další výzkum v oblasti mechanického matování skla.

Pro výběr vhodné varianty instalace hlavice do systému je použita rozhodovací analýza (tab. 2). Kritéria zvolená jako parametry rozhodovací analýzy jsou:

- Vyměnitelnost nástroje
- Pracovní prostor
- Zakládání skla
- Zatížení robotu
- Účinnost chlazení

Vzhledem k rozdílnosti váhy jednotlivých kritérií, je pro objektivní posouzení jejich důležitosti, využita metoda párového srovnání (tab. 1). Výsledkem je stanovení váhy jednotlivých kritérií uvedených v rozhodovací analýze.

Tab. 1 Párové srovnání instalace hlavice do systému

Párové srovnání					
Kritérium	1	2	3	4	5
1		2	3	4	5
2	2		2	4	5
3	3	2		4	5
4	4	4	4		4
5	5	5	5	4	

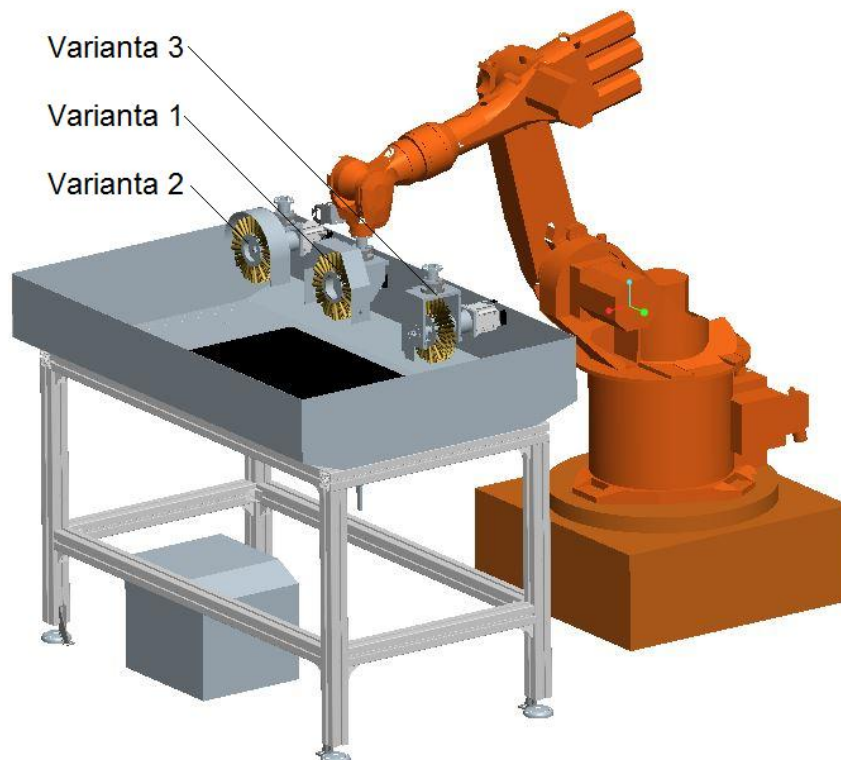
Tab. 2 Rozhodovací analýza instalace hlavice do systému

Rozhodovací analýza instalace hlavice do systému														
Párové srovnávací kritérium					Matice užitenosti alternativ									
					X		1		2		3		4	
Poř. číslo	Název kritéria	Počet voleb	Pořadí významnosti	Váha	Hodnota		Hodnota		Hodnota		Hodnota		Hodnota	
					p.h.	v.h.	p.h.	v.h.	p.h.	v.h.	p.h.	v.h.	p.h.	v.h.
1	Vyměnitelnost nástroje	0	5	1	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50
2	Pracovní prostor	2	3	3	100	300	90	270	50	150	90	270	50	150
3	Zakládání skla	1	4	2	100	200	60	120	35	70	100	200	100	200
4	Zatížení robotu	4	1	5	100	500	80	400	75	375	25	125	20	100
5	Účinnost chlazení	3	2	4	100	400	100	400	60	240	60	240	100	400
Celkem								1290		935		910		900
Užitnost v relativním vyjádření								86%		63%		61%		60%
Pořadí alternativ podle užitenosti								1.		2.		3.		4.

Na základě rozhodovací analýzy je nejvhodnější variantou instalace hlavice do systému varianta 1 – pohyblivá matovací hlavice s obráběním shora.

2.2.2. Koncepce konstrukce technologické hlavice

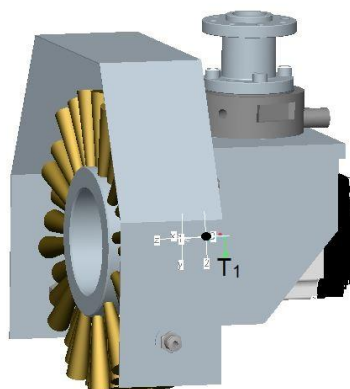
V souladu s technickými požadavky byly sestaveny tři různé koncepční návrhy konstrukce matovací hlavice. Jednotlivé návrhy jsou odlišné zejména v uložení matovacího nástroje v rámu. Naopak jejich společným prvkem je stejný systém instalace hlavice na přírubu robotu, jak je vidět na obr. 11, kde je zobrazeno uspořádání systému s robotem KUKA KR 16 a jednotlivými variantami hlavic.



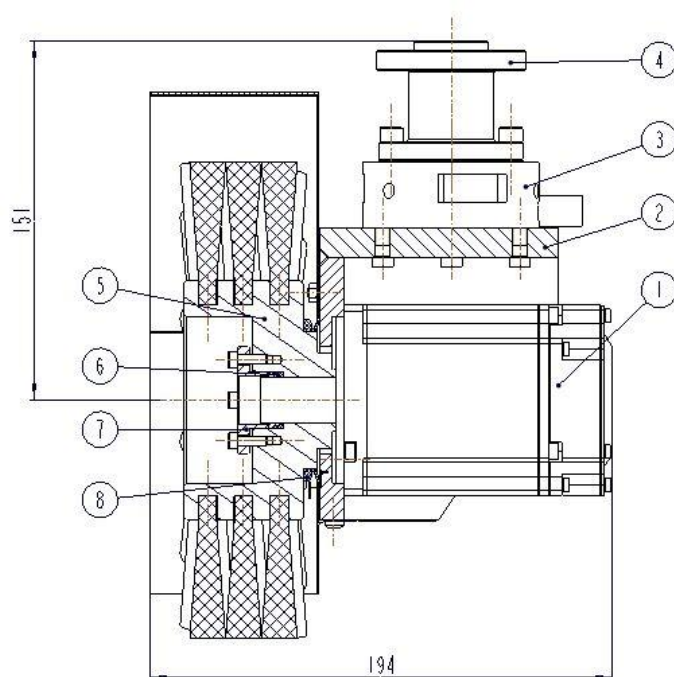
Obr. 11 Sestava robotu Kuka KR16 a technologických hlavic

Varianta 1

Pro tento návrh je charakteristické uložení matovacího nástroje – kartáče přímo na hřídel elektromotoru 1, jak je vidět na obr. 12 a obr. 13. Motor je připevněn v kapse rámu 2. Horní stěna rámu je osazena dynamometrem 3, spojení hlavice a příruby robotu je realizováno přírubou 4. Kartáč 5, těsně doléhající na osazení hřídele motoru, je na hřídel motoru fixován svěrným pouzdem 6. Svěrné pouzdro je zde použito ve formě samostatných prstenců a axiální síla na čelo pouzdra je vyvozena přírubou 7. Elektromotor je od pracovního prostoru hlavice oddělen rámovou stěnou. Toto oddělení však není celistvé a proto je zde použito těsnění 8.



Obr. 122 Hlavice varianta 1 (3D model)



Obr. 133 Hlavice varianta 1 (schéma)

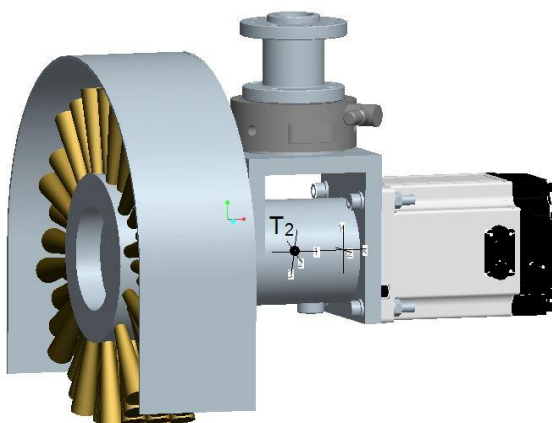
Výhodami tohoto konceptu jsou jeho kompaktnost a jednoduchost konstrukce. Hmotnost hlavice varianty 1 je $m_{h1} = 5,5$ kg. Výměna nástroje je jednoduchá a rychlá. Těžiště hlavice se nachází ve vzdálenosti $y_{t1} = 21,1$ mm (měřeno v ose kartáče) a $z_{t1} = 131,2$ mm od středu příruby (měřeno v ose příruby robotu). Poloha těžiště T_1 je znázorněna na obr. 13.

V případě návrhu této konstrukce je nutné počítat se silovým zatížením hřídele elektromotoru při výběru jeho vhodného typu.

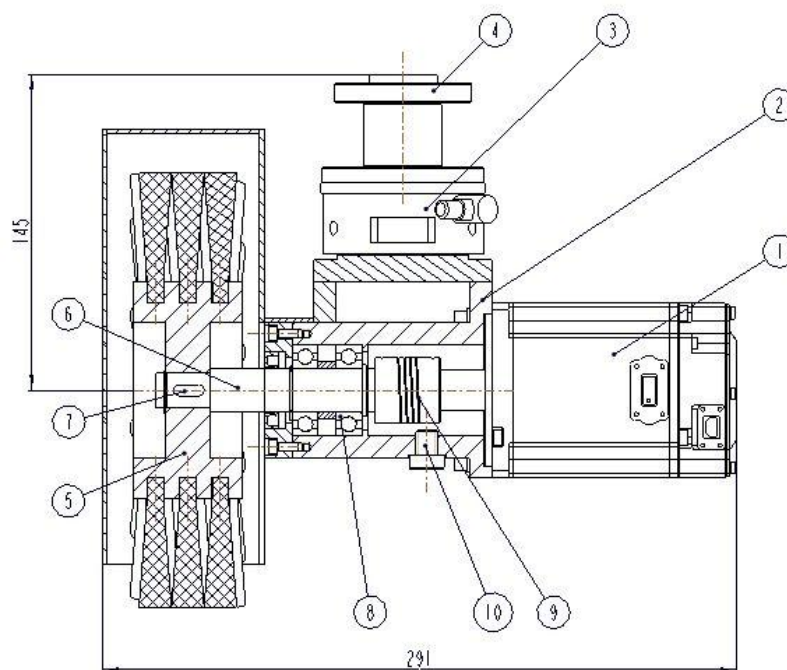
Varianta 2

Výhodou této předkládané varianty je nezatíženost motoru 1 silovými účinky. Model této varianty je uveden na obr. 14 a schéma hlavice je uvedeno na obr. 15. Motor je vsazen přímo do rámu 2 hlavice, na rám je připojen dynamometr 3 a příruba 4. Přenos krouticího momentu motoru je zajištěno pevným spojem matovacího kartáče 5 a hřídele 6 perem 7. Hřídel je uložena letmo v dvojici jednořadých kuličkových ložisek 8, které zachycují radiální sílu kartáče. Jednořadá kuličková ložiska lze použít díky působení malých radiálních sil a díky zaručené souososti hřídelí. Souosost je zaručena přesnou výrobou nátrubku rámu z jednoho polotovaru. Spojení hřídelí je realizováno spojkou 9. Spojka je s hřídelí spojena třecím silovým účinkem, který je vyvozen

šroubovým spojem. Nastavení tlakového účinku šroubového spoje je možné skrz otvor v rámu, který je utěsněn za provozu víčkem 10.



Obr. 144 Hlavice varianta 2 (3D model)



Obr. 155 Hlavice varianta 2 (schéma)

Výhodou tohoto návrhu je vhodnější rozdělení hmotnosti podle osy příruby. Těžiště hlavice se nachází ve vzdálenosti $y_{t2} = 0$ mm (měřeno v ose kartáče) a $z_{t2} = 137,5$ mm od středu příruby (měřeno v ose příruby robotu). Osa příruby robotu prochází těžištěm T_2 technologické hlavice. Mezi přednost se dále řadí eliminování účinků radiálních zatěžujících sil na motor. Nástroj lze jednoduše vyměnit uvolnění pojistného kroužku na hřídeli. Hmotnost varianty 2 technologické hlavice je $m_{h2} = 5,6$ kg.

Nevýhodou oproti variantě 1 jsou větší rozměry navrhovaného řešení podle obr. 15.

V případě výběru této varianty je nutné zkontrolovat minimální průměr hřídele d_{\min} [mm] při zatěžování krouticím momentem M_k [Nm] podle rovnice (2.8). Kde τ_{dk} [Mpa] je dovolené napětí v krutu, přepočítané z meze napětí v krutu τ_{kk} [Mpa] koeficientem bezpečnosti k [-]

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot D_h^3}{16}} \leq \tau_{Dk}, \quad (2.6)$$

$$\tau_{dk} = \frac{\tau_{kk}}{k}, \quad (2.7)$$

$$D_{\min} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot \tau_{dk}}}. \quad (2.8)$$

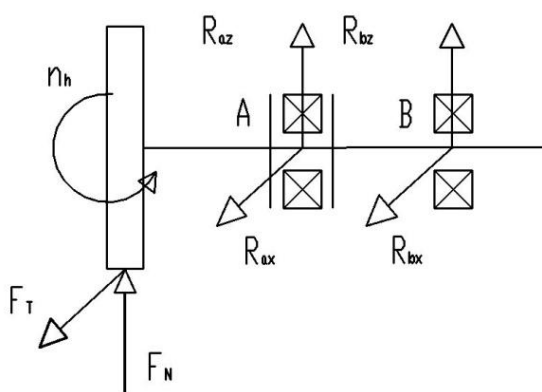
Dále by byl proveden výpočet únosnosti ložisek dle rovnice (2.9). R_{ar} [N] označuje velikost celkové radiální silové reakce v ložisku A. Silové účinky vznikají ve dvou rovinách od působení síly přitlaku kartáče F_N [N] a třecí síly kartáče F_T [N]

$$R_{ar} = \sqrt{R_{rx}^2 + R_{rz}^2}. \quad (2.9)$$

Trvanlivost ložiska L_h [hod] se vypočítá podle vztahu (2.10) pomocí dynamické únosnosti ložiska C [N] a otáček hřídele n_h [min^{-1}]

$$L_h = \left(\frac{C}{R_r}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n_h}. \quad (2.10)$$

Na obr. 16 je znázorněné schéma silového zatížení hřídele a reakcí v ložiskách.



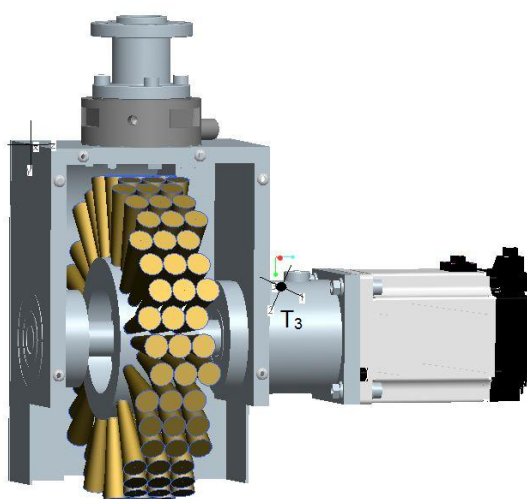
Obr. 16 Rozložení silových účinků na hřídeli

Dále by byla provedena kontrola otlacení boků pera v hřídeli a náboji dle rovnice 2.11. Kde p_m [Mpa] označuje měrný tlak, D_h [mm] je průměr hřídele, h [mm] je výška pera a l_p [mm] je jeho délka. Veličina p_d [Mpa] je dovolený tlak materiálu

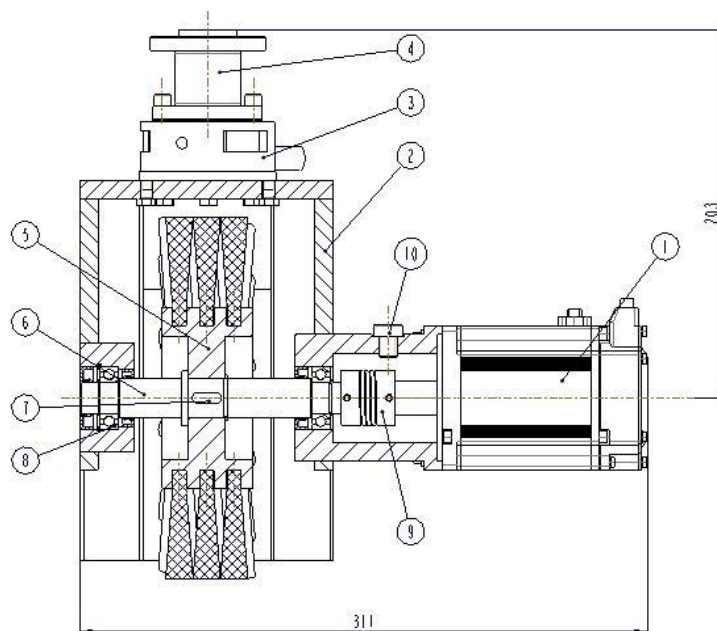
$$p_m = \frac{2 \cdot M_k}{0,45 \cdot D_h \cdot h \cdot l_p} \leq p_d. \quad (2.11)$$

Varianta 3

Poslední varianta je odlišná v přístupu k řešení rámu 2 hlavice, jak je zřejmé z obr. 17 a obr. 18. Základní části rámu se skládají z horní stěny a dvojice postranních stěn, v kterých jsou umístěny ložiskové domky, které vznikly vložením trubkových profilů. K horní stěně je připevněn dynamometr 3 a na jeho čelní stěnu dále příruba 4. Elektromotor 1 je přišroubován přímo na rám. Uvnitř nátrubku rámu je hřídel elektromotoru a vložená hřídel 6 spojena spojkou 9, která se stahuje podobně jako v případě varianty 2 skrz kruhový otvor ve stěně 10. V každém trubkovém profilu-ložiskovém domku je uloženo jedno ložisko 8, opět odděleno od pracovního prostoru guferem. Kartáč 5 je na hřídeli zajištěn pomocí pera 7 a pojistného kroužku.



Obr. 177 Hlavice varianta 3 (3D model)



Obr. 188 Hlavice varianta 3 (schéma)

Výhodou této varianty oproti dvěma ostatním je sjednocení osy nástroje a osy příruby robotu. Tato souosost usnadňuje programování dráhy koncového členu robotu.

Nevýhodou v porovnání s oběma variantami je obtížnější manipulace při výměně nástroje a hmotnost. Hmotnost hlavičky varianty 3 je $m_{h3} = 6,3$ kg a je tak při srovnání s ostatními variantami nejtěžší. Těžiště hlavičky T_3 je umístěno v nejvzdálenějším místě od koncového členu robotu. Těžiště hlavičky se nachází ve vzdálenosti $y_{t2} = -84$ mm (měřeno v ose kartáče) a $z_{t2} = 172,6$ mm od středu příruby (měřeno v ose příruby robotu). V případě výběru této varianty by bylo nutné provést kontrolní výpočty jako u varianty 2.

V tab. 3 je uvedeno porovnání hmotností hlavic a souřadnic těžiště jednotlivých variant.

Tab. 3 Porovnání vlastností variant technologické hlavičky

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Hmotnost [kg]	5,5	5,6	6,3
y_t [mm]	21,1	0	-84
z_t [mm]	131,2	137,5	172,6

Pro výběr vhodné varianty uložení nástroje je použita rozhodovací analýza (tab. 5). Kritéria zvolená jako parametry rozhodovací analýzy jsou:

- Spolehlivost systému
- Vyměnitelnost nástroje
- Hmotnost
- Pozice těžiště
- Složitost konstrukce

Vzhledem k rozdílnosti váhy jednotlivých kritérií je pro objektivní posouzení jejich důležitosti využita metoda párového srovnání (tab. 4).

Tab. 4 Párové srovnání konstrukce nástroje

Párové srovnání					
Kritérium	1	2	3	4	5
1		1	3	1	1
2	1		3	4	2
3	3	3		3	3
4	1	4	3		4
5	1	2	3	4	

Tab. 5 Rozhodovací analýza konstrukce nástroje

Rozhodovací analýza konstrukce nástroje												
Párové srovnávací kritérium					Matice užitenosti alternativ							
					X		1		2		3	
Poř. číslo	Název kritéria	Počet voleb	Pořadí významnosti	Váha	Hodnota		Hodnota		Hodnota		Hodnota	
					p.h.	v.h.	p.h.	v.h.	p.h.	v.h.	p.h.	v.h.
1	Spolehlivost systému	3	2	4	100	400	85	340	70	280	65	260
2	Vyměnitelnost nástroje	1	4	2	100	200	80	160	85	170	60	120
3	Hmotnost	4	1	5	100	500	100	500	100	500	85	425
4	Pozice těžiště	2	3	3	100	300	65	195	70	210	45	135
5	Složitost konstrukce	0	5	1	100	100	90	90	80	80	60	60
Celkem								1285		1240		1000
Užitnost v relativním vyjádření								86%		83%		67%
Pořadí alternativ podle užitenosti								1.		2.		3.

Na základě výsledků rozhodovací analýzy byla vybrána jako nejvhodnější varianta konstrukce matovacího nástroje varianta 1, kde je kartáč uložen přímo na hřídel motoru. Tato varianta má zejména dobrou spolehlivost celého systému, nízkou hmotnost a snadnou vyměnitelnost nástroje.

2.2.3. Koncepce technologického nástroje

Na základě rozboru technologie kartáčování a podle závěrů měření a výzkumu na experimentálním matovacím zařízení provedeném na Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace Technické univerzity v Liberci, byly zpracovány různé koncepce konstrukčního návrhu matovacího nástroje. Použitím různé konstrukce nástroje lze dosáhnout rozdílných optických vlastností matu.

Na základě výzkumu provedeného na experimentálním zařízení s odlišnými technologickými parametry a různými konstrukčními rozměry nástroje, byly stanoveny základní parametry, při kterých technologie vykazuje dobré optické výsledky

matovaného povrchu. Mezi optické vlastnosti se řadí povrch bez zjevných stop drah kartáče a rovnoměrný matovaný povrch po celé ploše plochého skla

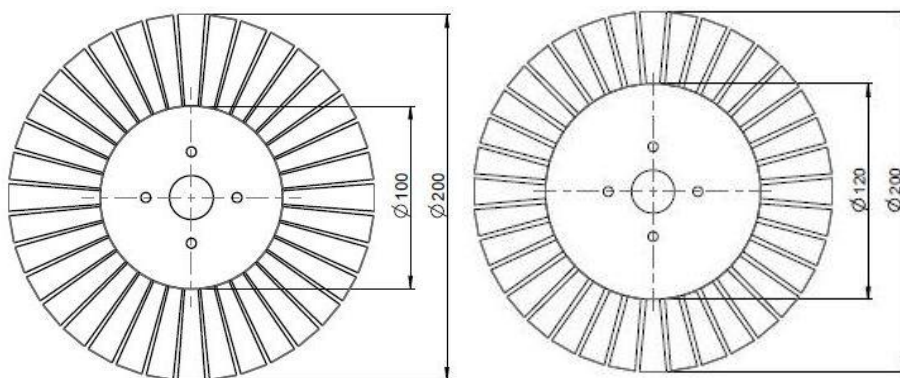
Těmito parametry jsou:

- Průměr kartáče – $D_k = 200$ mm
- Technologie lepení snopků do předvrtaných děr
- Průměr vlákna – $D_v = 0,4$ mm
- Průměr vlepené části snopků vláken – $D_s = 7,4$ mm
- Minimální hloubka předvrtané díry pro snopky – $h_s = 10$ mm [7].

Naopak lze usuzovat, že změnou ostatních parametrů dojde k ovlivnění výsledného optického vjemu matovaného povrchu.

Těmito parametry jsou:

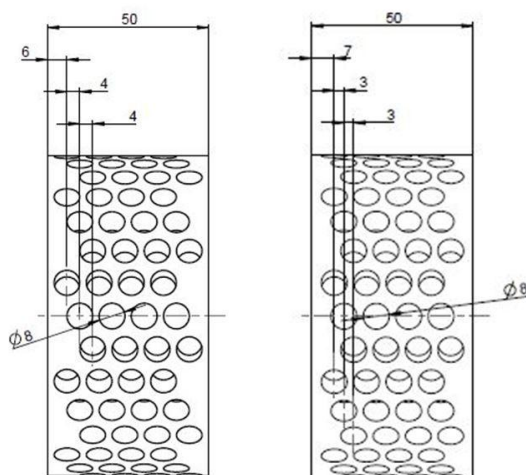
- Průměr jádra nástroje (délka vláken) – při provedených zkouškách bylo použito průměru náboje $D_{n1} = 100$ mm. Dalším možným průměrem jádra nástroje by mohl být průměr $D_{n2} = 120$ mm. Tímto konstrukčním zásahem by došlo ke zkrácení délky vláken. Dle rozboru technologie kartáčování, by to mělo mít za následek zvýšení matovacího účinku a zvýšení tuhosti vláken. Zvýšení tuhosti vláken by mělo přispět k méně výraznému roztřepení okraje matu, což je pro návrh konstrukčního řešení nástroje výhodná vlastnost. Názorný rozdíl v délce snopků a průměru jádra je uveden na Obr. 19.



Obr. 19 Koncepce rozměrů jádra nástroje

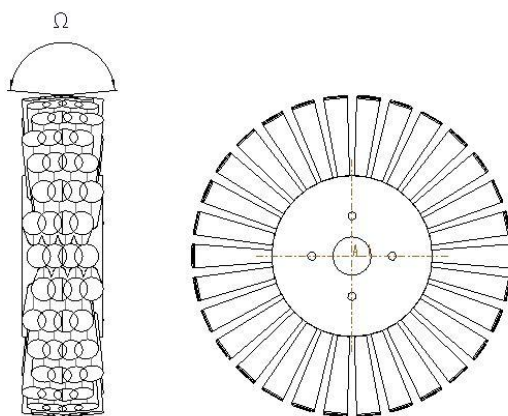
- Rozměr brusného materiálu (Mesh) – účinnost matování lze měnit použitím zrn s rozdílným rozměrem. Podle patentu [2] a závěrů měření [7] je základní hodnotou Mesh 80.
- Přesazení snopků v jednotlivých řadách – při provedených zkouškách bylo odzkoušeno přesazení jednotlivých děr o $1/3$ a $1/2$. Zkušební matovací

nástroj byl délky 400 mm, lze tedy usuzovat, že při použití výrazně zkráceného nástroje v délce 50 mm, bude výsledný efekt odlišný. Hustší přesazení snopků 3/8 pozitivně ovlivňuje optický vjem matu, na druhou stranu by mohlo dojít k negativnímu projevu na jeho okraji – větší třepení. Konstrukční návrh variantního uspořádání nástroje je na obr. 20.



Obr. 20 Koncepce přesazení řad nástroje

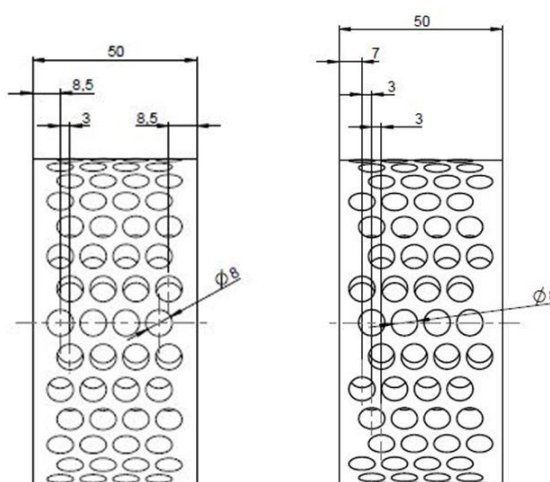
- Činný tvar nástroje – na základě předpokladu rozdílu kvality matu ve středu a na okrajích matovaného obrazce, by se dalo tohoto výhodně využít. Klesající délka vláken od středu nástroje k jeho okraji by měla za následek postupnou změnu intenzity matu a roztřepený okraj by tak byl součástí dezénu. Tvar orovnění nástroje je uveden na obr. 21.



Obr. 21 Koncepce orovnění nástroje

- Počet přesazených řad – variantou konstrukce nástroje je počet vůči sobě přesazených řad. Konceptní návrh kartáče s rozdílným počtem přesazených řad

je zobrazen na obr. 22. V prvním případě je použito pouze dvou přesazených řad, u druhé je válcovitý povrch kartáče opatřen trojicí opakujících se řad děr. Na okraji první varianty nástroje se tak dostává do záběru o 1/3 více snopků vláken než v případě nástroje s třemi přesazenými řadami. Větší počet řad by tak měl způsobit lepší kvalitu matu uprostřed obrazce. Tohoto efektu je dosaženo díky lepšímu překrytí snopků. Naopak by mohlo dojít k nedokonalému vytvoření matu na okraji obrazce, jelikož tato část povrchu dochází do styku s menším počtem snopků.



Obr. 22 Koncepce počtu přesazených řad děr nástroje

2.3. Výběr pohonu matovacího nástroje

Požadované parametry elektropohonu byly stanoveny z výsledků měření zkušebního matovacího zařízení. Nejlepší kvality matovaného povrchu je dosaženo při obvodové rychlosti kartáče $v_o = 32$ m/s. Rozměry matovacího kartáče jsou průměr 200 mm a šířka 50 mm. Uvedené obvodové rychlosti při stanoveném průměru je dosahováno při otáčkové frekvenci cca $n_k \doteq 3000$ min⁻¹ (3055 min⁻¹). Dalším parametrem pohonu je výstupní moment na hřídeli. Měřením byl určen měrný krouticí moment $M_{km} = 1,43$ Nm/100 mm šíře kartáče. Pro navrženou šířku kartáče je krouticí moment $M_k = 0,72$ Nm, navržený pohon by měl pracovat s momentovou rezervou 60%, takže požadovaný výstupní moment na hřídeli motoru je M_{kp} 1,8 Nm. Změřený měrný výkon motoru je P_m 447W/100 mm šíře kartáče. Pro tento případ opět s 60% rezervou je požadovaný výkon $P_p = 560$ W. Vzhledem ke specifikům konstrukčního řešení je dalším parametrem maximální zatížení výstupní hřídele pohonu v radiálním směru. [7]

Výstupní hřídel motoru je zatěžována normálovu silou F_N při obrábění skla. Měrná velikost této síly se rovná 70N/100 mm šíře kartáče. Minimální požadovaná zatěžující síly výstupní hřídele pohonu je výslednice zatěžujících sil $F_R = 35 \text{ N}$. Pro zaručení bezpečného provozu je uvažováno s dvojnásobným koeficientem bezpečnosti, byl tedy vyhledán pohon s minimální radiální zatěžující silou o velikosti $F_{rm} 70 \text{ N}$.

Dalšími technickými parametry jsou:

- jmenovité otáčky – $n_n = 3000 \text{ min}^{-1}$
- výkon – $P_p = 560 \text{ W}$
- jmenovitý moment na hřídeli – $M_{kp} = 1,8 \text{ Nm}$

Pro pohon matovacího nástroje je zvolen elektromotor Omron Accurax G5 – R88M-K 75030H (Obr. 23). Jmenovitý krouticí moment tohoto modelu AC servomotoru bez brzdy je $M_n = 2,4 \text{ Nm}$, které dostatečně pokrývá požadovaný krouticí moment $M_{kp} = 1,8 \text{ Nm}$. Tento pohon byl vybrán díky svým odpovídajícím technickým parametrům a zejména díky nízké hmotnosti a kompaktnímu tvaru. Motor je navíc konstruován s krytím stupně IP 67, zařízení je tak prachotěsné a odolné vůči krátkodobému ponoření do vody. K řízení tohoto typu motoru je využito driveru G5 EtherCAT - R88D-KN10F. Další parametry motoru jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 Parametry motoru Omron Accurax G5 – R88M-K 75030H-S2 [10]

Jmenovitý krouticí moment	M_n	2,4 Nm
Maximální krouticí moment	M_n	7,1 Nm
Jmenovité otáčky	$n_n [\text{min}^{-1}]$	3000
Maximální otáčky	$n_{\max} [\text{min}^{-1}]$	6000
Jmenovitý výkon	$P_n [\text{W}]$	750
Max. radiální zatížení	$F_r [\text{N}]$	490
Hmotnost	$m_m [\text{kg}]$	2,3
Rozměry	$\text{šxv x h} [\text{mm}]$	80x80x112,2

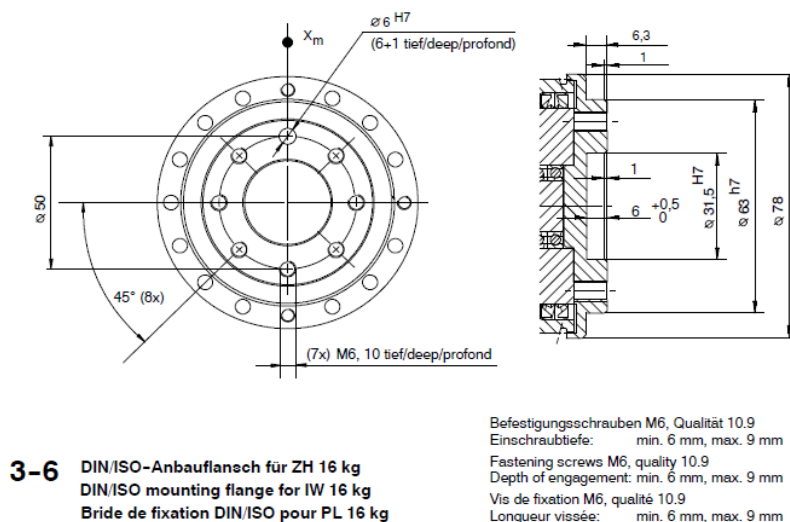


Obr. 23 Elektromotor Omron Accurax G5 – R88M-K 75030H-S2 [10]

2.4. Technické podmínky instalace efektoru na Robot KUKA KR 16

Technologická hlavice bude v souladu se zadáním navržena s předpokládanou instalací na průmyslový robot s nosností 16 kg, konkrétně na model KUKA KR 16. Na základě použití průmyslového robotu jsou stanoveny další technické podmínky návrhu.

- Příruba robotu – musí svými rozměry odpovídat přírubě polohovací ústrojí robotu Kuka KR 16, rozměry jsou uvedeny na obr. 24.

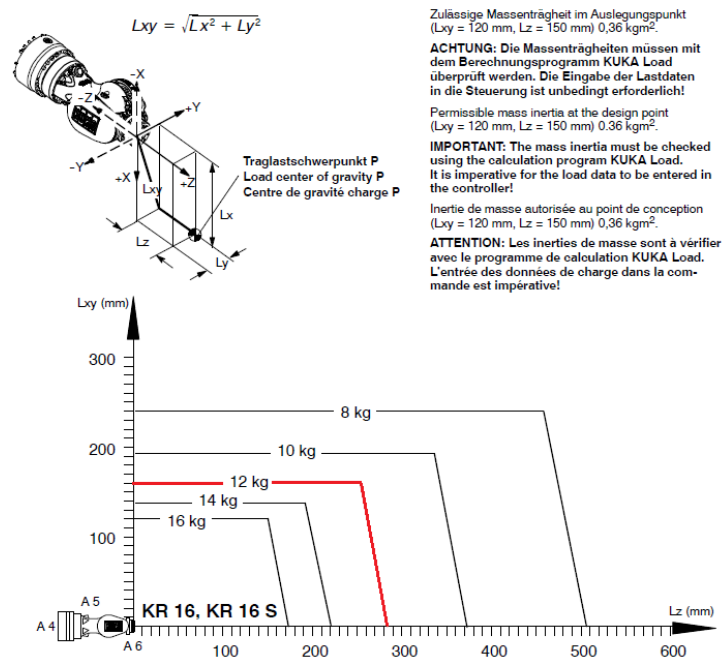


Obr. 24 Příruba robotu KUKA KR 16 [8]

- Hmotnost – nosnost robotu je 16 kg. Maximální velikost hmotnosti zátěže (efektoru) připojeného na robot je funkcí vzdálenosti jejího těžiště od středového bodu příruby, jak je uvedeno na obr. 25. Maximální hmotnost hlavice byla stanovena $m_{hmax} = 12$ kg. Podle zatěžující charakteristiky může být těžiště hlavice v maximální vzdálenosti $L_{xy_{max}} = 150$ mm a $L_z = 265$ mm od středu příruby robotu. Vzhledem k předpokládané symetričnosti hlavice kolem osy x bude těžiště umístěno právě na této ose. Parametry technologické hlavice jsou pro přehlednost uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Maximální parametry technologické hlavice

Maximální parametry technologické hlavice	
Hmotnost	12 kg
Vzd. těžiště v osy y – L_y	150 mm
Vzd. těžiště v osy y – L_z	265 mm



Obr. 25 Zatěžující charakteristika robotu KUKA KR 16 [8]

Multi-osový senzor (dynamometr) – pro účely měření silového zatížení efektoru během matovacího procesu je zařízení osazeno 6-osým dynamometrem. Měření bude provedeno zejména za účelem stanovení zatěžujících sil v radiálním a axiálním směru matovacího nástroje a klopných momentů. Předpokládané hodnoty maximálního zatížení dynamometru jsou uvedeny společně s parametry vybraného typu v tab. 8. Multi-osový senzor byl vybrán z řady zařízení firmy SCHUNK model FTS-Gamma Sl65-5 [11].

Tab. 8 Předpokládané silové zatížení a parametry dynamometru

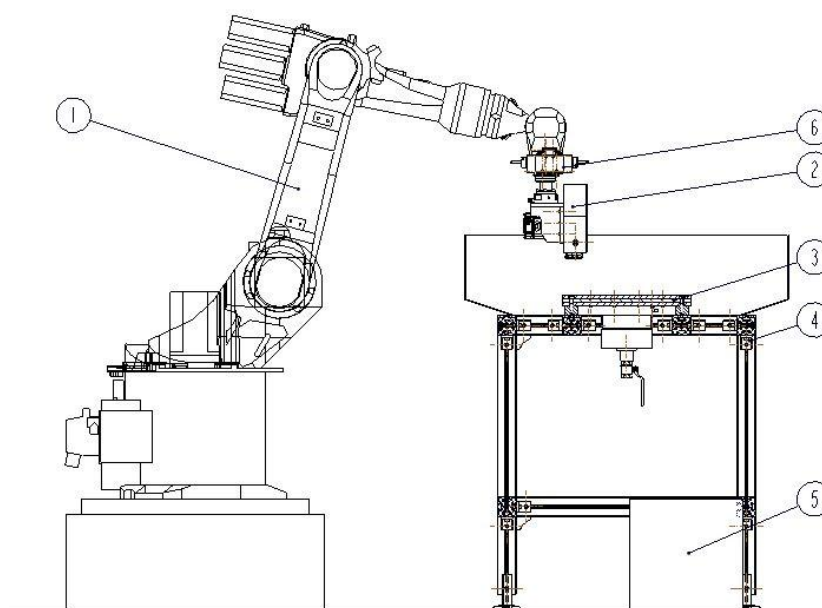
Předpokládané silové zatížení dynamometru		50% rezerva měřícího rozsahu	Parametry dynamometru Schunk
Maximální silové zatížení v ose z F_z [N]	50	100	± 200
Maximální silové zatížení v osy x,y $F_{x,y}$ [N]	20	40	± 65
Maximální momentové zatížení M_{xyz} [Nm]	1,5	3	± 5

3. Konstrukční řešení

Tato zpráva předkládá ucelenou konstrukci matovacího zařízení s technologickou hlavicí. V následující kapitole je popsáno konstrukční řešení vybrané varianty. V první řadě je uveden stručný popis celé konstrukce zařízení, dále je kapitola doplněna o přehled přiložené výkresové dokumentace a na ní navazuje popis konstrukčního řešení technologické hlavice.

3.1. Konstrukční řešení matovacího zařízení

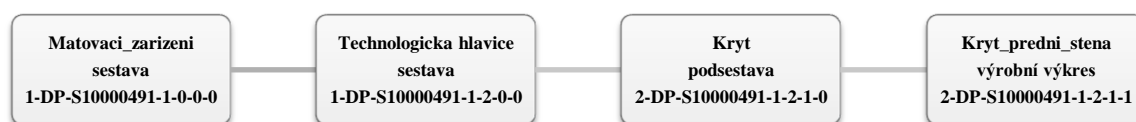
Průmyslový robot KUKA KR 16 1 slouží k polohování a nesení technologické hlavice 2, jak předkládá obr. 26. Do systému je zakomponována podtlaková deska 3, která fixuje sklo během matování. Podtlaková deska je umístěna na dně odpadní vany 4. Její zapuštění do vany zajišťuje dostatečnou ochranu okolí před stříkající chladicí kapalinou. V systému je filtrační zařízení 5, které slouží k filtraci odpadní chladicí kapaliny. Filtrovaná kapalina je vedena zpět do chladicího systému technologické hlavice. Tok kapaliny v chladicím okruhu je řízen elektromagnetickým 4/3 rozvaděčem Parker D1VW1CNKC FS, který je připevněn na orientační ústrojí robotu. Hlavice je osazena dvěma chladicími tryskami Lechler 61021616 s plochým rozstříkem kapaliny v úhlu 90 °. Oboustranné chlazení umožňuje reverzaci otáček kártače. Zařízení se vyznačuje malým silovým zatížením robotu, účinným chladicím systémem, ochranou okolí před znečištěním chladicí kapalinou a velikostí pracovního prostoru.



Obr. 26 Matovací zařízení

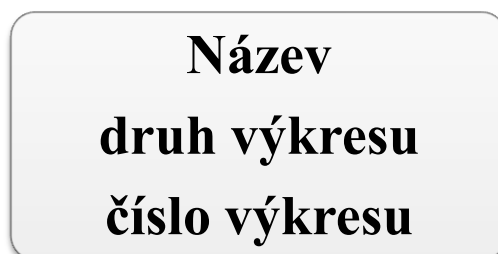
3.2. Schéma výkresové dokumentace

K návrhu matovacího zařízení s technologickou hlavicí byla zpracována kompletní výkresová dokumentace. Následující schéma (obr. 27) předkládá systém vazeb mezi jednotlivými výkresy.



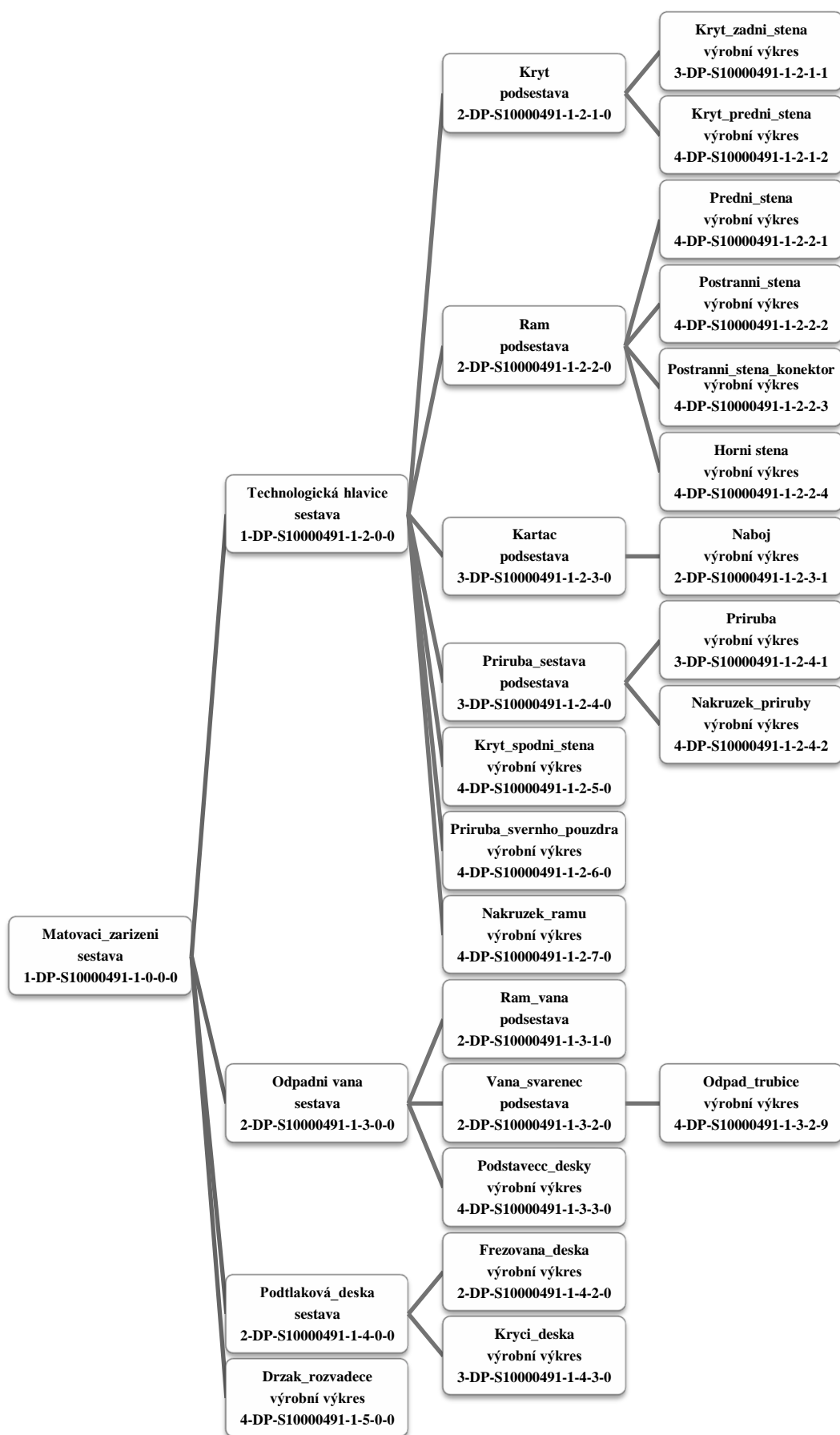
Obr. 27 Schéma vazeb výkresové dokumentace

Základním výkresem je sestava Matovací_zarizeni, která je výkresem kompletního matovacího zařízení. Výkres sestavy Technologicka_hlavice je sestavou samostatné technologické hlavice. Výkres podsestavy Kryt je jednou částí výkresu Technologická_hlavice a je vytvořen s ohledem na výrobu a sestavení této části. Výrobní výkres Kryt_predni_stena slouží k přímé výrobě jednotlivých komponent. Řazení ostatních výkresů je obdobné. Značka výkresu obsahuje jeho název, číslo výkresu a typ výkresu jak je uvedeno na obr. 28.



Obr. 28 Značka výkresu

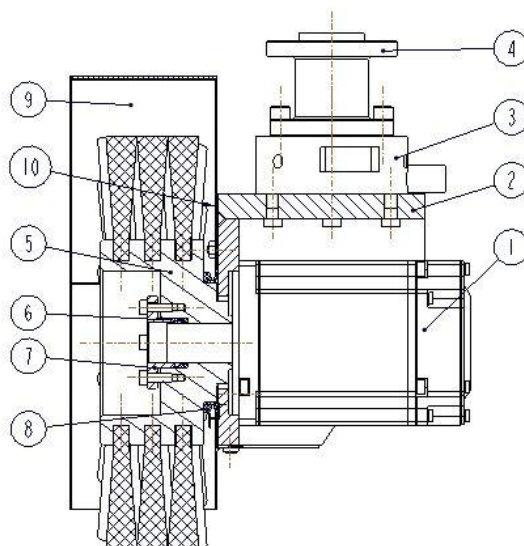
Kompletní schéma výkresové dokumentace přiložené k této práci je na obr. 29. Dokumentace obsahuje sestavný výkres matovacího zařízení, dále výkresy sestav technologické hlavice, odpadní vany a podtlakové desky. Celá dokumentace je doplněna o výkresy podsestav a výrobních výkresů.



Obr. 29 Schéma kompletní výkresové dokumentace

3.3. Konstrukce technologické hlavice

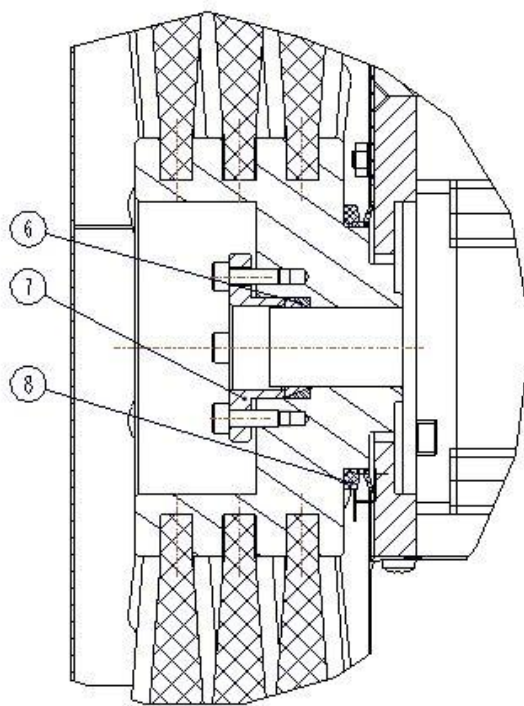
Technologická hlavice byla navržena pro upevnění na robot KUKA KR 16 dle koncepční varianty 1. Matovací nástroj je dle koncepce uložen přímo na hřídel elektromotoru od firmy Omron typ Accurax G5 – R88M-K 75030H 1, který byl zvolen na základě výše uvedeného rozboru. Pro řízení elektromotoru je užito servořízení Accurax G5. Celá konstrukce hlavice je uvedena na obr. 30.



Obr. 30 Schéma technologické hlavice

Motor je uložen v pouzdře, které je zároveň nosným rámem 2 hlavice. Rám je svařen z duralových desek o tloušťce 10 mm. Rám je dále osazen dynamometrem 3 od firmy SCHUNK typ FT Gamma. Dynamometr je připevněn k rámu šroubovými spoji, které procházejí otvory v horní desce rámu. V případě spojení robotu KUKA KR 16 a uvedeného typu dynamometru nelze připojit dynamometr přímo na přírubu robotu, a proto byla pro montáž navržena příruba 4. Matovací kartáč 5 se skládá z duralového náboje a vlepených snopků brusných vláken. Kartáč je uložen přímo na výstupní hřídel elektromotoru a je na ní fixován svěrným pouzdrem SKF FX 30 19-24 6. Uložení kartáče je předloženo na obr. 31. Pouzdro se skládá pouze z kuželových prstenců. Pro vyvození třecí síly pouzdra byla navržena příruba svěrného pouzdra 7, která doléhá na čelo svěrného pouzdra a způsobuje zasunutí prstenců přes sebe. I přes vysoký stupeň krytí motoru (IP 67) je použit těsnicí kroužek Trelleborg V- kroužek TWVA 00600. Těsnicí kroužek je s přesahem nasazen na náboj a svým břitem doléhá na přední stěnu rámu. Jeho specifické vlastnosti způsobují, že při obvodových rychlostech 15-20 m/s (v použitém rozměru odpovídá rozsahu otáček 2900-3800 min⁻¹) je tření mezi břitem

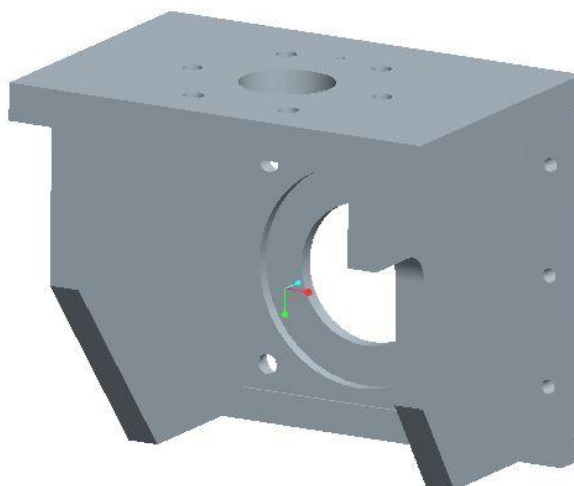
těsnícího kroužku a stěnou téměř nulové a to při zajištění těsnící schopnosti. Tato vlastnost tak významně prodlužuje životnost V-kroužku a snižuje nároky na jeho údržbu. Motor je tak oddělen od pracovního prostoru hlavice rámem a těsnícím kroužkem. Matovací kartáč je zakrytován krytem z nerez oceli 9, který je k rámu přišroubován. Pro zaručení těsnosti krytu je mezi rám a kryt vloženo vláknitopryžovité těsnění POWERgasket 10 [12].



Obr. 31 Uložení nástroje

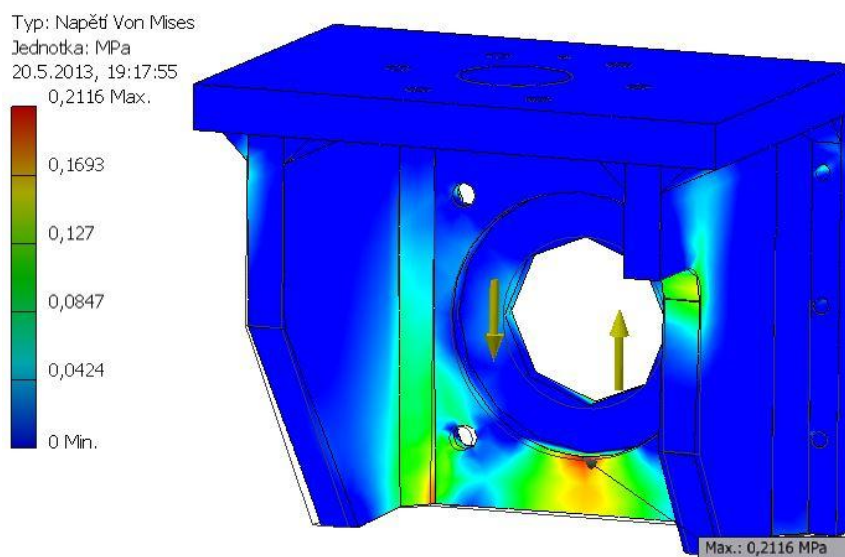
3.3.1. Konstrukce rámu technologické hlavice

Rám hlavice, jenž je její nosnou částí, je svařen z plochých desek z duralu ČSN 42 4400. Model rámu je zobrazen na obr. 32. Materiál rámu byl zvolen s ohledem na jeho dobré mechanické vlastnosti a nízkou hmotnost. V přední stěně je osazený otvor, do kterého přímo zapadá elektromotor. V kapse rámu je čtveřice otvorů Ø 6,4 mm na roztečné kružnici Ø 90mm pro upevnění motoru šrouby M6. Dále je v přední desce 6 otvorů Ø 4,3 mm sloužících k připevnění krytu šrouby M4. V horní desce rámu jsou otvory pro šroubové spoje 8X Ø 6,4 mm na roztečném průměru Ø 66,4 mm, kterými prochází šrouby spojující rám s dynamometrem. Jedna z postranních stěn má vybrání pro konektor motoru. Celková hmotnost rámu je $m_r = 1,03$ kg.

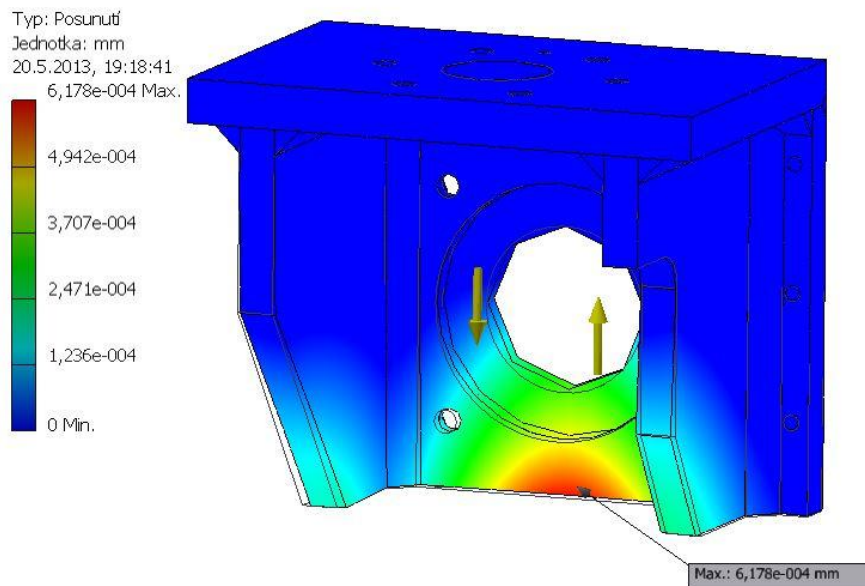


Obr. 32 Rám technologické hlavičky

Pro kontrolu pevnosti a posunutí rámu byla provedena pevnostní analýza programem Autodesk Inventor 2013 zobrazená na obr. 33 a obr. 34. Analýza byla provedena pro zatížení rámu normálovou silou F_N [N] působící na kartáč a tíhovou silou motoru F_{Gm} [N]. Na základě analýzy vzniká v rámu maximální napětí $\sigma_{vM} = 0,21$ MPa a největší posunutí $u = 62$ μm . Tyto výsledky jsou velice výhodné pro získání solidních výsledků matování. Pro zaručení přesnosti polohování kartáče a zanoření do povrchu skla je podstatné zachování tvaru rámu, aby nedocházelo k změně pozice nástroje vůči koncovému bodu robotu.



Obr. 33 Napětí v rámu



Obr. 34 Posunutí v rámu

Pro čtveřici šroubových spojů držících elektromotor v rámu byl proveden kontrolní pevnostní výpočet [13]. Šrouby jsou zatíženy normálovou silou F_N a tíhovou silou motoru F_{Gm} jak je uvedeno na obr. 35.

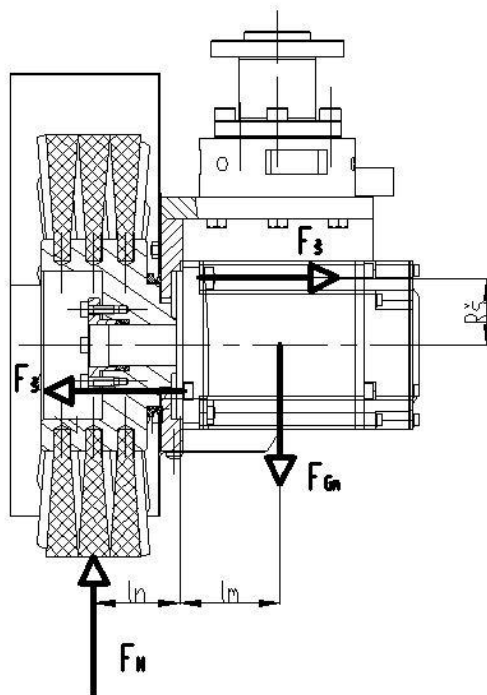
Počet šroubů ČSN EN ISO 02 1143 M6 x 20	4 ks
Normálová zatěžující síla	$F_N = 35 \text{ N}$
Vzdálenost působíště síly F_N	$l_N = 40 \text{ mm}$
Tíhová síla elektromotoru	$F_{Gm} = 23 \text{ N}$
Vzdálenost působíště síly F_{Gm}	$l_m = 60 \text{ mm}$
Vzdálenost osy šroubů od hřídele	$R_s = 32 \text{ mm}$
Dovolené napětí v tahu šroubu (ČSN 11 343)	$\sigma_d = 200 \text{ MPa}$

Osová síla F_s v jednom šroubu je vypočtena dle vztahu (3.1), který vychází z momentové rovnováhy

$$F_s = \frac{F_N \cdot l_N + F_{Gm} \cdot l_m}{R_s \cdot 4} = \frac{35 \cdot 0,04 + 23 \cdot 0,06}{0,032 \cdot 4} = 21,7 \text{ N.} \quad (3.1)$$

Minimální průměr šroubu je výsledkem rovnice (3.2)

$$\sigma_d = \frac{F_s}{S} = \frac{F_s}{\frac{\pi \cdot D_s^2}{4}} \dots D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot F_s}{\pi \cdot \sigma_d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 21,7}{\pi \cdot 150}} = 0,43 \text{ mm.} \quad (3.2)$$



Obr. 35 Zatížení šroubových spojů

Použité šroubové spoje splňují svou velikostí dovoleného napětí v tahu.

3.3.2. Uložení nástroje

Matovací nástroj je uložen na výstupní hřídeli motoru o průměru $\varnothing = 19$ mm a využitelné délce $l = 32$ mm. Upevnění je realizováno samostředícím svěrným pouzdem SKF FX 30 19-24. Axiální síla svěrného pouzdra, způsobující spojení hřídele a náboje, je vyvozena přírubou svěrného pouzdra. Příruba je přišroubována k náboji čtyřmi šrouby M4x10 na průměru $\varnothing 34$ mm. Schéma uspořádání je možné shlédnout na obr. 10. Pro uvedené pouzdro byl proveden kontrolní výpočet velikosti náboje (jádra) kartáče dle katalogové dokumentace SKF [14].

Koeficienty byly zvoleny dle tabulek výrobce SKF:

tvarový faktor (úzký náboj)	$f_{tv} = 0,8$
mez průtažnosti materiálu (hliníková slitina)	$\sigma_p = 415 \text{ Mpa}$
měrný tlak náboje	$p_n = 110 \text{ Mpa}$
součinitel průměru náboje	$S_p = 1,25$
Vnitřní průměr náboje	$D_{in} = 24 \text{ mm}$

Minimální vnější průměr náboje vychází ze vztahu (3.3)

$$D_{en \min} = D_n \cdot 1,25 = 24 \cdot 1,25 = 30 \text{ mm.} \quad (3.3)$$

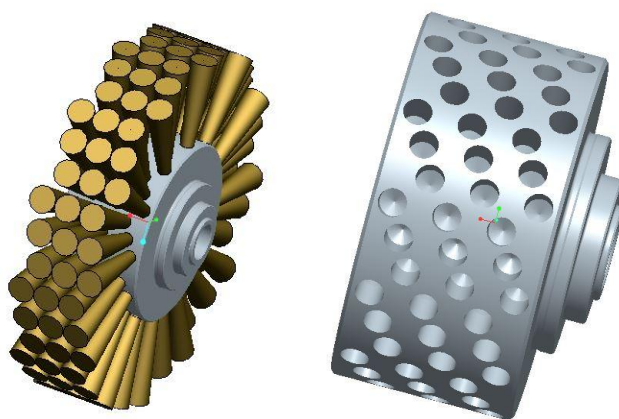
Minimální průměr náboje, tak musí být $D_{en \min} = 30 \text{ mm.}$

3.3.3. Matovací nástroj - kartáč

Kartáč se skládá z náboje z duralu a snopků vláken, které jsou vlepeny do děr na válcovém povrchu náboje. Po vlepení snopků do kartáče následuje orovnění kartáče, kterým je dosaženo kruhovitosti povrchu kartáče. Jednotlivé snopky jsou složeny z vláken o průměru $D_v = 0,4$ mm. Činná délka vláken je $l_{cv} = 50$ mm, hloubka zapuštění vláken v kartáči je 10 mm a rezerva pro orovnění kartáče je 2 mm. Celková délka vláken je $l_{cv} = 62$ mm. Model kartáče a náboje je zobrazen na obr. 36. Celková hmotnost svazků m_{cs} [kg] byla stanovena podle vztahu (3.4), kde m_s [kg] je hmotnost snopku vláken a p_s počet snopků.

$$m_{cs} = p_s \cdot m_s = 108 \cdot 0,002 = 0,22 \text{ kg} \quad (3.4)$$

Průměr náboje je 100 mm. Náboj byl navržen s třemi přesazenými řadami děr po obvodu. Každý otvor má průměr 7,8 mm a hloubku 10 mm. Celkově je na obvodu pláště kartáče 36 řad pootočených o úhel 10° . Náboj má dle návrhu hmotnost $m_n = 0,63$ kg.



Obr. 36 Model kartáče a náboje

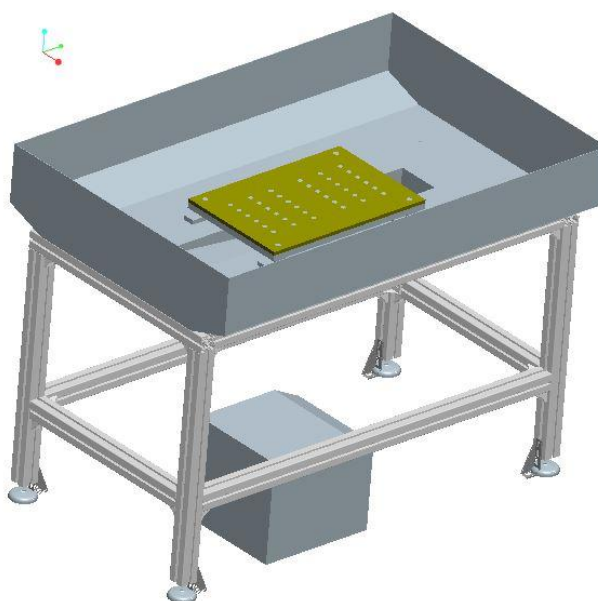
3.4. Konstrukce periferních zařízení matovacího zařízení

Nad rámec zadání práce byly zpracovány konstrukční návrhy periferních zařízení celého systému (obr. 37). Mezi tato zařízení patří podtlaková deska, která fixuje sklo v neměnné pozici během matování a odpadní vana, která slouží k zachytávání chladicí kapaliny.

Sklo je drženo pomocí podtlakové síly na povrchu desky. Navrženou konstrukci podtlakové desky lze využít pro skla do maximálních rozměrů 600x400 mm. Systém desky se skládá z frézované desky z oceli ČSN 11 373.0 o rozměrech 600x400x12, která má v sobě systém kanálu pro rozvod podtlakového vzduchu. Systém kanálu je po

obvodu utěsněn těsněním Schmalz DI-10 1K MOS 20. Na frézovanou desku dosedá z jedné strany krycí ocelová deska z materiálu ČSN 11 373.0 a velikosti 600x400x8, která je s ní spojena šrouby. Na opačnou stranu frézované desky je navulkanizována pryž. Po vulkanizaci jsou vytvořeny otvory skrz pryž a frézovanou desku, které slouží k realizaci podtlakové úchopné síly. Povrch pryže je styčným místem desky a skla. Aby byla zaručená geometrická tolerance rovinnosti a drsnosti povrchu, následuje finální úprava povrchu. Předepsané hodnoty tolerancí je třeba bezpodmínečně dodržet, jelikož by vlivem průhybu skla mohlo dojít k vytvoření nedokonalého matovaného povrchu.

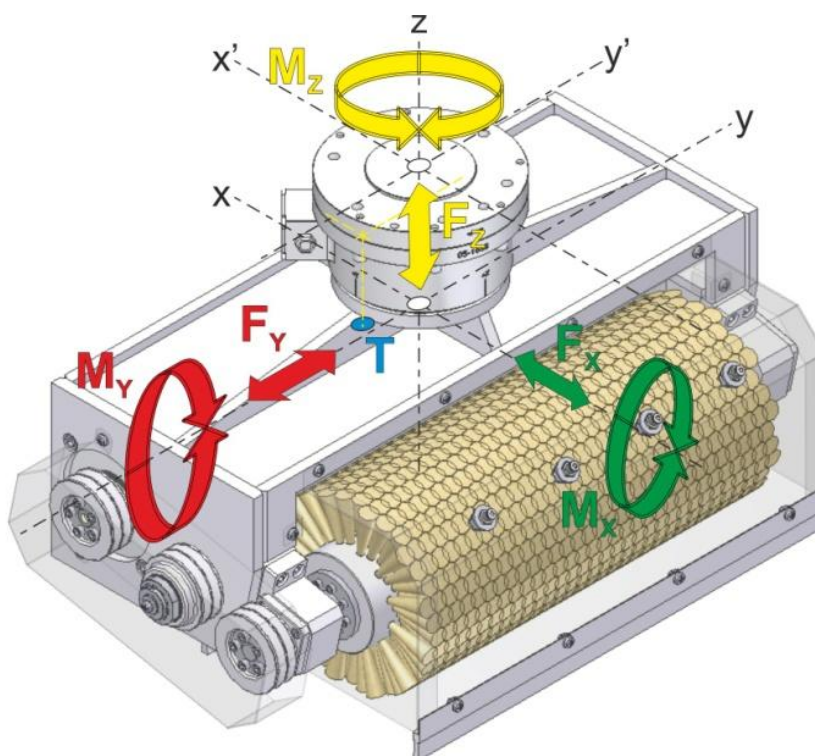
Podtlaková deska je umístěna přímo na dno odpadní vany a je přišroubována k podstavcům umístěným ve vaně. Vana plní funkci rámu pro podtlakovou desku, dále chrání okolí před stříkající chladicí kapalinou a zároveň kapalinu shromažďuje. Ta je pak filtrována ve filtru. Odpadní vana se skládá z rámu z extrudovaných profilů a vany. Rám je složen z extrudovaných profilů 60x60 řady 8-45 firmy Misumi. Výšku stolu lze nastavovat a nivelovat nastavitelnými nohami. Celý stůl je pak možné pomocí patek ukotvit k podlaze. Vana je svařena z plechových dílů oceli ČSN 11 373.0 dle výkresové dokumentace. K rámu je přichycena šrouby a spojovacími maticí Misumi HNT88.



Obr. 37 Odpadní vana s podtlakovou deskou

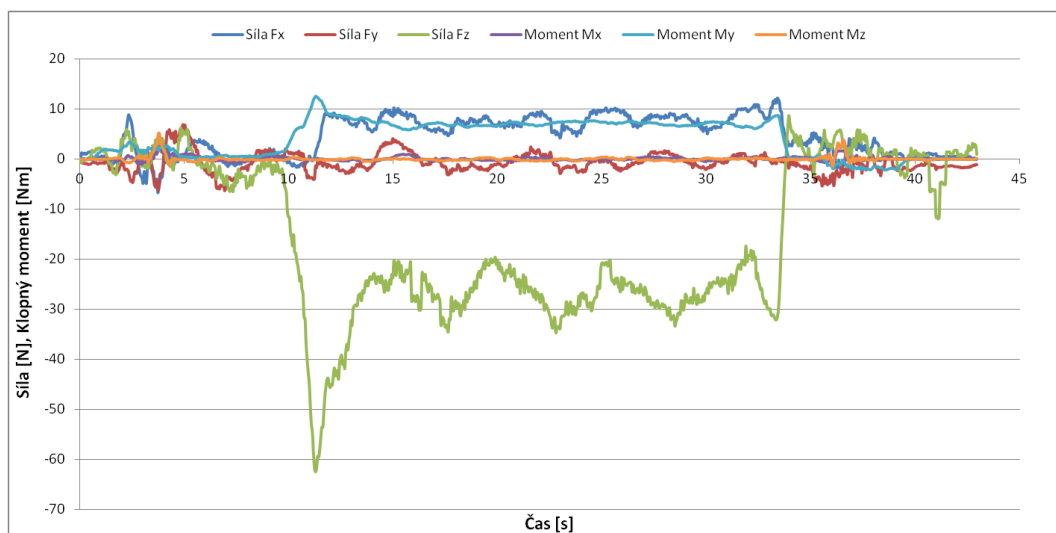
4. Odzkoušení funkčního vzorku a formulace technických podmínek

S ohledem na finanční náročnost realizace matovací hlavice a s ohledem na možnost využití hlavice určené pro kartáče šíře 500 mm bylo odzkoušení funkčního vzorku kartáče šíře 50 mm provedeno na již zhotovené hlavici. Hlavice byla dříve využita k experimentálnímu měření matovacího procesu pro velkoformátové sklo na Ústavu pro nanomateriály, pokročile technologie a inovace Technické univerzity v Liberci. Na této instituci byly provedeny i testy pro tuto práci. Pro přehlednost je uvedeno schéma působících sil a klopných momentů na hlavici použitou k měření na obr. 38.

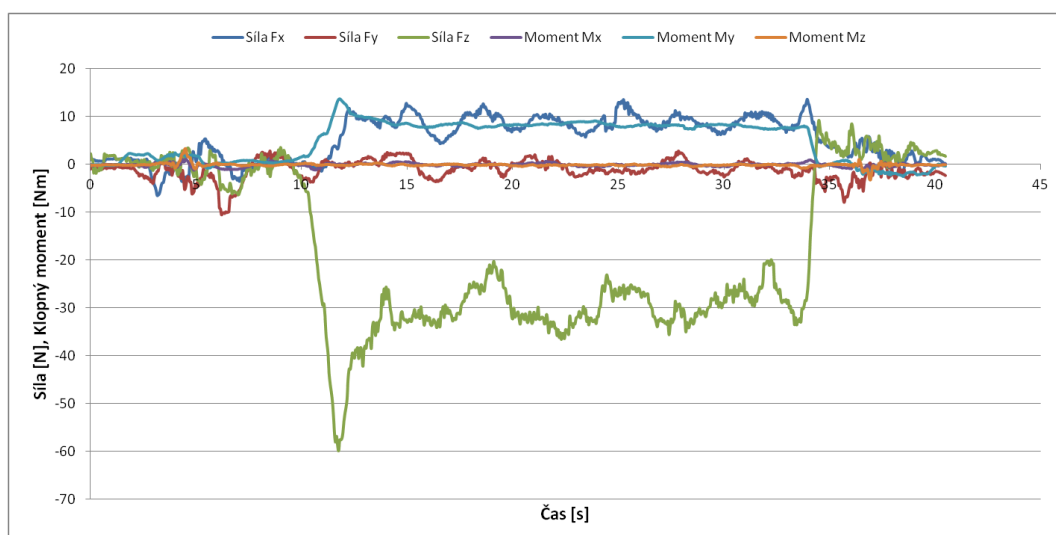


Obr. 38 Schéma působících sil a klopných momentů [7]

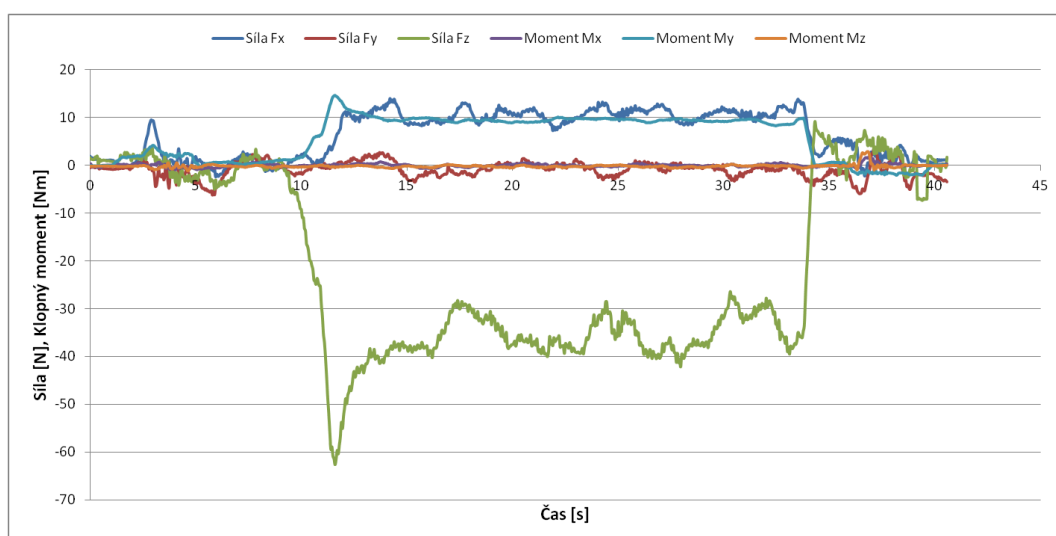
Během zkoušení bylo provedeno měření silového zatížení kartáče pro hloubky jeho zanoření do povrchu skla od 1 mm do 2,5 mm. Měření bylo provedeno při otáčkách $n_k = 3000 \text{ min}^{-1}$. Výsledky měření jsou uvedeny níže na obr. 39, obr. 40, obr. 41, obr. 42.



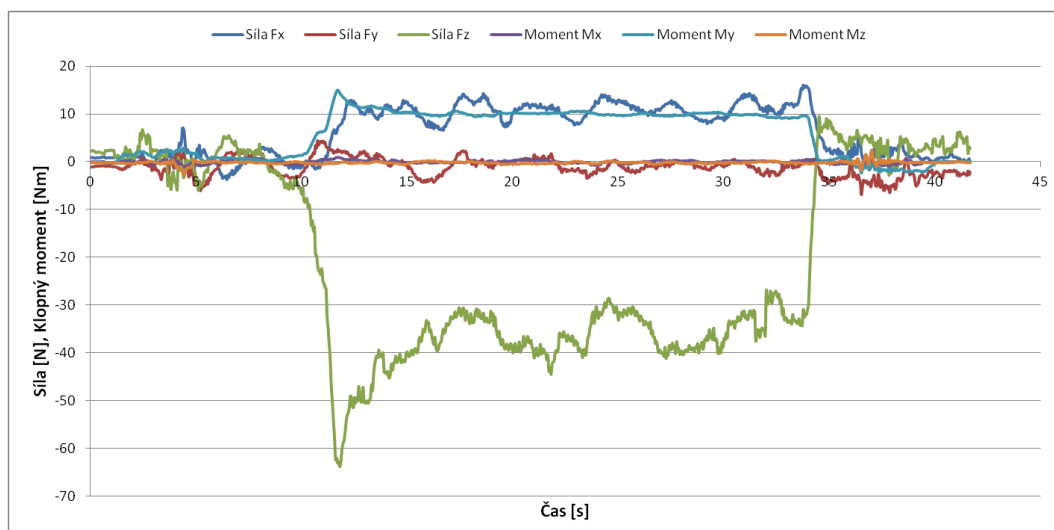
Obr. 39 Silové zatížení kartáče, zanoření 1 mm



Obr. 40 Silové zatížení kartáče, zanoření 1,5 mm



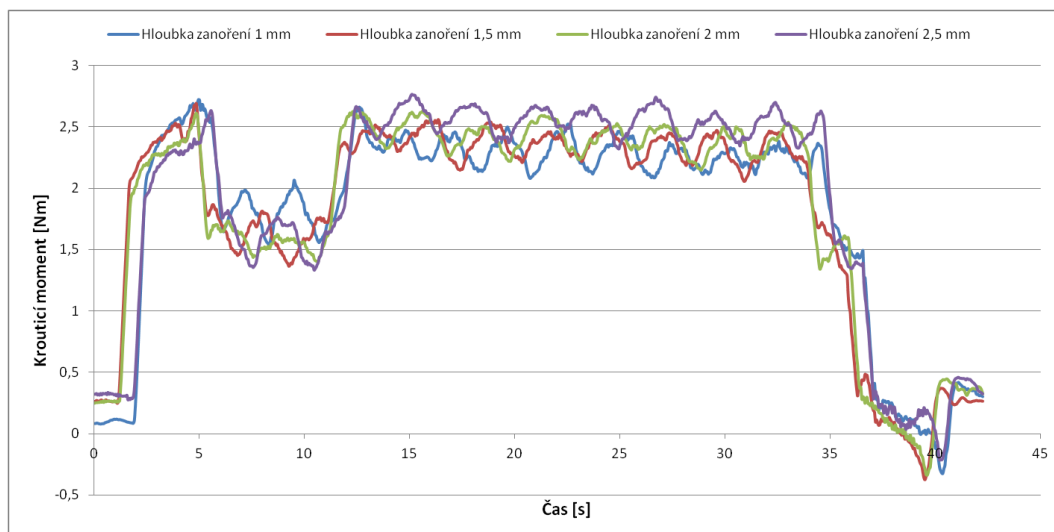
Obr. 41 Silové zatížení kartáče, zanoření 2 mm



Obr. 42 Silové zatížení kartáče, zanoření 2,5 mm

Z výsledků měření vyplývá, že největší zatěžující síla je v ose kolmé na rovinu povrchu skla (síla F_z). Velikost této normálové síly je v závislosti na hloubce zanoření kartáče $F_z = 40$ N až 60 N. Další silou je tečná síla kartáče (F_x), která nabývá hodnot $F_x = 10$ N až 15 N. Síla v ose kartáče (F_y) nabývá zanedbatelných hodnot. Dále působí na kartáč klopný moment (M_y), jehož velikost je v intervalu $M_y = 8$ až 15 Nm. Velikosti ostatních klopných momentů (M_x, M_z) jsou zanedbatelné.

Mimo měření silového účinku bylo provedeno i měření krouticího momentu pro stejné provozní parametry. Výsledný průběh krouticích momentů je uveden na obr. 43.

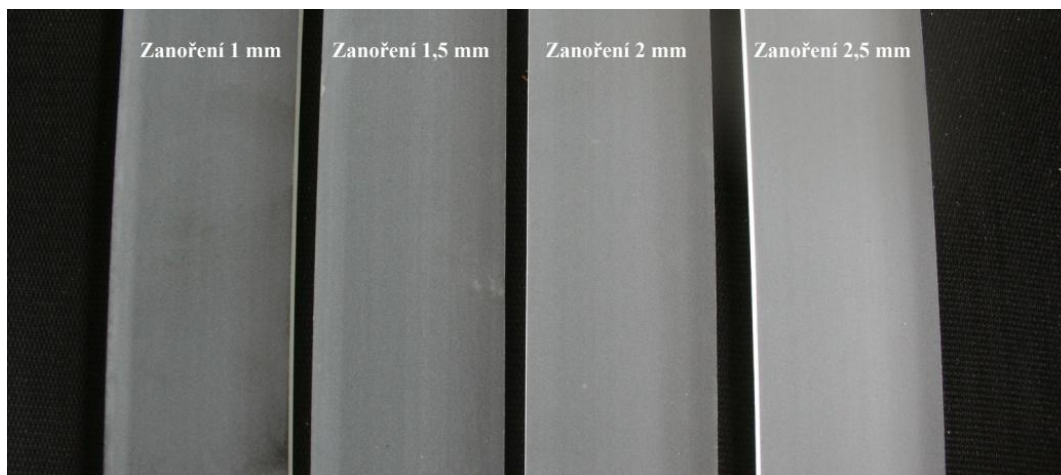


Obr. 43 Průběh krouticích momentů

Krouticí moment dosahuje maximální hodnoty $M_k = 3$ Nm při zanoření 2,5 mm. Na základě výsledků zprávy předešlého měření realizovaného s touto hlavicí na Ústavu pro nanomateriály, pokročile technologie a inovace Technické univerzity v Liberci

vyplývá, že ztrátový moment této hlavice je $M_{ztr} = 1,6 \text{ Nm}$. [7] Lze tak usuzovat, že velikost činného momentu pro kartáč šíře 50 mm je $M_{\xi} = 1,4 \text{ Nm}$.

Výsledky měření ve velké míře korespondují s hodnotami zatížení a velikosti krouticího momentu, které byly brány v úvahu při návrhu konstrukce matovací hlavice.



Obr. 44 Porovnání matovaných skel

Na obr. 44 je zobrazeno porovnání optického vjemu matu na povrchu skla pro různé úrovně zanoření kartáče do povrchu. Z výsledků vyplývá, že průhlednost matu závisí zejména na hloubce zanoření kartáče. Z porovnání je patrný projev pruhovitosti u skel s hloubkou zanoření 1 mm a 1,5 mm. Lze tak doporučit matování s hloubkou zanoření od 2 mm, u kterého se neprojevuje nerovnoměrnost matu.

Pro úplnost je předložena tabulka s technickými parametry pro efektivní využití mechanického matování s kartáči šíře 50 mm (tab. 9).

Tab. 9 Technické parametry pro efektivní využití mechanického matování

Provozní parametry	
Posuv	75 mm/s
Obvodová rychlost	32 m/s
Hloubka zanoření	od 2 mm
Silové zatížení (zanoření 2,5 mm, obvod. rychlost 32 m/s, posuv 75 mm/s)	
Normálová síla	60 N
Tečná síla	15 N
Klopný moment (M_y)	15 Nm
Činný krouticí moment	1,4 Nm
Činný výkon	440 W

5. Technickoeconomické zhodnocení

Úkolem diplomové práce bylo navržení technologické hlavice pro mechanické matování a odzkoušení funkčního vzorku hlavice a formulace technických podmínek pro efektivní využití mechanického matování.

V rámci technického zhodnocení je předložen výsledek konstrukčního řešení technologické hlavice a v ekonomickém zhodnocení jsou vyčíslené náklady na realizaci hlavice

5.1. Technické zhodnocení

Diplomová práce předkládá konstrukční řešení technologické hlavice pro mechanické matování s instalací na robot s užitečnou nosností do 16 kg.

Technologická hlavice je v systému matování skla nesena průmyslovým robotem. Průmyslový robot má vysokou pohyblivost (6° volnosti), které lze využít k vytváření asymetrických matovaných obrazců. Hmotnost technologické hlavice je $m_h = 5,5$ kg, robot a zejména orientační ústrojí robotu, tak není zatíženo maximální dovolenou zatěžující silou. Nízké hmotnosti hlavice je dosaženo implementací motoru s hmotností $m_m = 2,3$ kg. Motor lze krátkodobě provozovat při $n_{\max} = 6000$ ot/min, což umožňuje provádět měření s širokým rozsahem nastavení technických podmínek. Kartáč je složen z duralového náboje a vlepených snopků plastových vláken. Svěrné pouzdro drží kartáč na výstupní hřídeli elektromotoru. Sejmutí kartáče a jeho výměna jsou rychlé a jednoduché. Rám, skládající se z duralových plochých desek, má dostatečnou tuhost a jeho deformace vlivem zatěžujících sil jsou malé. Posuny v konstrukci rámu by neměly ovlivňovat výsledky matování. K chlazení nástroje a povrchu plochého skla je hlavice vybavena dvojicí trysek s plochým rozstříkem v úhlu 90° . Směr toku chladicí kapaliny je řízen 4/3 rozvaděčem a závisí na směru otáčení kartáče. Hlavice je osazena 6-osým senzorem, kterým měří zatěžující silové účinky během provozu hlavice.

Na základě provedeného měření zkušebního vzorku kartáče byly stanoveny technické podmínky pro efektivní využití mechanického matování. Práce předkládá ucelený návrh matovacího zařízení s technologickou hlaví, který lze využít k experimentálnímu ověřování technologie mechanického matování plochého skla.

5.2. Ekonomické zhodnocení

Na základě cen jednotlivých komponent, materiálu a předběžného odhadu výrobních a režijních nákladů byly stanoveny celkové náklady na realizaci matovací hlavice shrnuté v tab. 10.

Tab. 10 Přehled nákladů

Součást	Popis	Cena/ks (kg)	ks (kg)	Cena
Elektromotor	Accurax R88M-K75030F-S2	37 220 Kč	1	37 220 Kč
Driver	R88D-KN10F-ECT	28 420 Kč	1	28 420 Kč
Dynamometr	Schunk FTS-Gamma S165-5	48 000 Kč	1	48 000 Kč
Rozvaděč	Parker D1VW1CNKC	4000 Kč	1	4000 Kč
Rám	Svařenec	12000 Kč	1	12000 Kč
Kryt	Svařenec	3000 Kč	1	3000 Kč
Příruba	Obrobek	2000 Kč	1	2000 Kč
Náboj	Obrobek	3000 Kč	1	3000 Kč
Ostatní komponenty	Obrobek	2000 Kč	-	2000 Kč
Vlákna kartáče	HT Filament	30 000 Kč	0,25 kg	7500 Kč
Výroba kartáče	Spokar	1500 Kč	1	1500 Kč
				148 640 Kč
Náklady na montáž a oživení hlavice		6 000 Kč		6 000 Kč
Náklady celkem				154 640 Kč

Závěr

Diplomová práce, věnující se technologii úpravy povrchu plochého skla mechanickým broušením kartáčem s abrazivy a konstrukci technologické hlavice aplikující tuto technologii, byla postupně řešena v souladu se zadáním práce.

V první kapitole byla provedena rešerše matování skla s důrazem na patentovanou technologii mechanického matování. Tato část obsahuje porovnání stávajících metod opracování povrchu s nově zavedenou technologií. Dále předkládá rozbor technických podmínek, které byly základními parametry pro návrh koncepčních variant technologické hlavice.

Kapitola druhá obsahuje koncepční návrhy instalace hlavice v systému na výrobu plochého skla. Dále byly v rámci této kapitoly stanoveny varianty instalace hlavice do systému s robotem a varianty konstrukce technologické hlavice. Na základě rozhodovací analýzy byly vybrány jako nejvhodnější varianty instalace technologické hlavice na přírubu robotu se směrem obrábění shora a uložení kartáče přímo na výstupní hřídel motoru. Závěrem kapitoly byly navrženy koncepční varianty kartáče a byl proveden výběr pohonu hlavice.

Kapitola třetí je věnována konstrukčnímu řešení vybrané varianty technologické hlavice a je doplněna o konstrukci periférních zařízení umístěných do systému mechanického matování skla s průmyslovým robotem KUKA KR 16. V rámci konstrukčního řešení byla zpracována výkresová dokumentace, které je uvedena v příloze diplomové práce.

V rámci čtvrté kapitoly byl odzkoušen funkční vzorek kartáče o šířce 50 mm a na základě výsledků měření byly stanoveny technické podmínky pro efektivní využití mechanického matování.

Závěrečná kapitola přináší technické a následně ekonomické zhodnocení návrhu technologické hlavice.

Na základě provedeného hodnocení se lze domnívat, že práce je použitelným podkladem pro realizaci technologické hlavice a její aplikaci při dalším výzkumu a vývoji mechanického matování plochého skla.

Seznam použité literatury

- [1] HOTAŘ, Vlastimil; KLEBSA, Vladimír. *Silikáty, sklo, žárovzdorné materiály*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-949-X.
- [2] ČAPKA, Vlastimil. *Způsob úpravy povrchu plochého skla a zařízení k provádění tohoto způsobu*. 302 636 Česká republika, 10. Zář 2010.
- [3] POPOVIČ, Štěpán. *Výroba a zpracování plochého skla*. Praha : Grada Publishing, a.s., 2009. ISBN 978-80-247-3154-4.
- [4] GILLESPIE, LaRoux K. *DEBURRING and EDGE FINISHING HANDBOOK*. Michigan : Society of Manufacturing Engineers, 1999. 0-87263- 501-5.
- [5] SKLOPAN LIBEREC, a.s. A new revolution method of matt glass production. místo neznámé : SKLOPAN LIBEREC,a.s.
- [6] ŠVECOVÁ, Jana. Skláři z Liberecka dobývají svět. *Liberecký deník. cz*. [Online] 11. Listopad 2012. [Citace: 17. Duben 2013.] <http://liberecky.denik.cz/z-regionu/sklari-z-liberecka-dobývaji-svet-20121101.html>.
- [7] NOVOTNÝ, František. *Inovace strojů a zařízení a implementace pokročilých technologií do procesu automatické výroby a zpracování plochého skla*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2012.
- [8] Kuka Roboter GmbH. Kuka specifikace KR 16-2. [Online] [Citace: 5. leden 2013.] http://www.kuka-robotics.com/res/sps/e6c77545-9030-49b1-93f5-4d17c92173aa_Spez_KR_16_en.pdf.
- [9] NOVOTNÝ, František. *Základy robotiky, seperáty skript TU v Liberci*. 2006, 256 s.
- [10] Omron. Rotační servomotory. [Online] [Citace: 26. únor 2013.] http://industrial.omron.cz/cs/products/catalogue/motion_and_drives/servo_systems/rotary_servo_motors/accurax_g5/default.html.
- [11] SCHUNK GmbH & Co. KG. Force Sensor - Schunk. [Online] [Citace: 15. leden 2013.] http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/FT-Gamma_EN.pdf.
- [12] Trelleborg Sealing Solutions Czech s.r.o. *Tesnění rotačních pohybů*. [Technická dokumentace] Rakovník : Trelleborg Sealing Solutions Czech s.r.o., 2013.

- [13] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1968.
- [14] Group, SKF. *Svěrná pouzdra SKF FX*. [Technická dokumentace] místo neznámé : SKF Group 210, 2010.

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení technických požadavků na konstrukci matovací hlavice	19
Obr. 2 Silové zatížení kartáče	20
Obr. 3 Izolované matovací zařízení	22
Obr. 4 Matovací zařízení zařazené do výrobní linky	23
Obr. 5 Schéma koncepcí matovacího zařízení	24
Obr. 6 Varianta 1 – Pohyblivá matovací hlavice – obrábění shora	25
Obr. 7 Varianta 2 – Pohyblivá matovací hlavice – obrábění zdola	26
Obr. 8 Varianta 3 – Stacionární matovací hlavice – obrábění zdola	27
Obr. 9 Zatížení podtlakové desky silou F_N	28
Obr. 10 Varianta 4 – Stacionární matovací hlavice – obrábění shora	29
Obr. 11 Sestava robotu Kuka KR16 a technologických hlavic	32
Obr. 12 Hlavice varianta 1 (3D model)	32
Obr. 13 Hlavice varianta 1 (schéma)	33
Obr. 14 Hlavice varianta 2 (3D model)	34
Obr. 15 Hlavice varianta 2 (schéma)	34
Obr. 16 Rozložení silových účinků na hřídeli	35
Obr. 17 Hlavice varianta 3 (3D model)	36
Obr. 18 Hlavice varianta 3 (schéma)	36
Obr. 19 Koncepce rozměrů jádra nástroje	39
Obr. 20 Koncepce přesazení řad nástroje	40
Obr. 21 Koncepce orovnění nástroje	40
Obr. 22 Koncepce počtu přesazených řad děr nástroje	41
Obr. 23 Elektromotor Omron Accurax G5 – R88M-K 75030H-S2 [10]	42
Obr. 24 Příruba robotu KUKA KR 16 [8]	43
Obr. 25 Zatěžující charakteristika robotu KUKA KR 16 [8]	44
Obr. 26 Matovací zařízení	45
Obr. 27 Schéma vazeb výkresové dokumentace	46
Obr. 28 Značka výkresu	46
Obr. 29 Schéma kompletní výkresové dokumentace	47
Obr. 30 Schéma technologické hlavice	48
Obr. 31 Uložení nástroje	49
Obr. 32 Rám technologické hlavice	50
Obr. 33 Napětí v rámu	50
Obr. 34 Posunutí v rámu	51
Obr. 35 Zatížení šroubových spojů	52
Obr. 36 Model kartáče a náboje	53
Obr. 37 Odpadní vana s podtlakovou deskou	54
Obr. 38 Schéma působících sil a klopných momentů [7]	55
Obr. 39 Silové zatížení kartáče, zanoření 1 mm	56
Obr. 40 Silové zatížení kartáče, zanoření 1,5 mm	56

Obr. 41 Silové zatížení kartáče, zanoření 2 mm	56
Obr. 42 Silové zatížení kartáče, zanoření 2,5 mm	57
Obr. 43 Průběh kroutících momentů.....	57
Obr. 44 Porovnání matovaných skel.....	58

Seznam tabulek

Tab. 1 Párové srovnání instalace hlavice do systému.....	30
Tab. 2 Rozhodovací analýza instalace hlavice do systému	31
Tab. 3 Porovnání vlastností variant technologické hlavice	37
Tab. 4 Párové srovnání konstrukce nástroje	37
Tab. 5 Rozhodovací analýza konstrukce nástroje.....	38
Tab. 6 Parametry motoru Omron Accurax G5 – R88M-K 75030H-S2 [10].....	42
Tab. 7 Maximální parametry technologické hlavice	43
Tab. 8 Předpokládané silové zatížení a parametry dynamometru	44
Tab. 9 Technické parametry pro efektivní využití mechanického matování.....	58
Tab. 10 Přehled nákladů	60